





# **Desenvolvimento da Metodologia de Fabrico de Protótipos de Torneiras pelo Processo da Cera Perdida**

*Luís Filipe Minhava Peixoto Morais Moreira*

**Dissertação do MIEM**

Orientador na FEUP: Prof. Jorge Lino

Orientador no INEGI: Eng.º Rui Neto



**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**  
**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Junho 2014



## Resumo

A realização de protótipos é, nos dias de hoje, uma etapa indispensável para a inovação e criação de novos produtos. Quando aliado a isso se pretende obter protótipos em ligas metálicas, o processo de fundição de cera perdida é certamente um método a ter em conta, pela sua capacidade de gerar peças complexas, dispensando muitas vezes operações de acabamento como a maquinagem, bem como a compra ou fabrico de ferramentas específicas.

Esta dissertação tem como principal objetivo desenvolver uma metodologia que permita obter protótipos de torneiras com geometrias complexas, nomeadamente secções interiores pequenas com grande extensão de comprimento, especificamente utilizando o processo de fundição de cera perdida para o efeito. O modo de desenvolvimento dessa metodologia passa, numa primeira fase, pela recolha bibliográfica e estudo das torneiras, assim como do processo de fundição escolhido. Posteriormente, já numa fase experimental, é descrito todo o processo, com as diferentes etapas percorridas, desde a criação de um modelo virtual em CAD 3D, até atingir o produto final – torneiras maciças e ocas em latão.

No decorrer do processo existem caminhos alternativos que podem ser seguidos, nomeadamente na geração de um modelo em cera que permita iniciar o processo de cera perdida. Nesse sentido, há essencialmente dois tipos de obtenção dos modelos em cera – métodos de conversão indiretos e diretos. O método de conversão indireto envolve a impressão em estereolitografia de elementos de apoio à construção, por vazamento, de um molde de injeção de cera. Já o método de conversão direto aplicado neste trabalho corresponde à impressão 3D do modelo em cera.

Uma vez que estas alternativas têm diferentes particularidades, não só processuais, mas também de custos, são analisados os dados obtidos e define-se qual o número de modelos a partir do qual compensa optar por um método de conversão ou outro.

Inerentes a qualquer processo de fundição, especialmente quando se trata de criar novos produtos, são os defeitos. É realizada uma análise visual das peças vazadas e identificados os defeitos, sendo descritas as possíveis causas e propostas soluções que os minimizem ou eliminem de futuras peças vazadas. As contrações sofridas no decorrer do processo são também analisadas globalmente através de uma análise dimensional, comparando os valores de compensação atribuídos às medidas reais nas peças vazadas.

Este percurso, com a descrição de todos os passos e materiais utilizados, assim como a análise de resultados (dos comentários e observações) deverão ser entendidos como uma metodologia a seguir para a criação de protótipos de torneiras, pelo processo de cera perdida.



## **Development of the Manufacturing Methodology of Faucets Prototypes by the Lost Wax Process**

### **Abstract**

Prototyping is, nowadays, a prerequisite for innovation and creation of new products. When it is sought to obtain prototypes in metal alloys, the process of lost wax cast casting is certainly a method to take into account for its ability to create complex parts, often dispensing finishing operations such as machining and the purchase or making of specific tools.

This thesis aims to develop a methodology to obtain prototypes of faucets with complex geometries, including small inner sections with large extension length, specifically using the process of lost wax casting. The developing of this methodology starts initially with literature review and study of faucets, as well as the chosen casting process. Subsequently, in an experimental phase, the whole process is described, with the different taken steps, starting with the creation of a virtual 3D CAD model up to the final product – hollow brass faucets.

In the process there are alternative paths that can be followed, namely the generation of the wax model that allows the lost cast process to begin. In this sense, there are essentially two ways of obtaining the wax models – methods of indirect and direct conversion. The indirect method of conversion involves printing stereolithography elements to allow the construction of a wax injection mold. The direct conversion method applied in this study corresponds to the 3D print of the wax model. Since this alternatives have different particularities, not only procedural but also economical, the data obtained is analyzed and it's defined the number of models by which is preferable to opt to a method rather than the other.

Inherent in any casting process, especially when it comes to creating new products, are the defects. A visual examination of the resulting casting parts is performed and identified the respective defects. The probable cause and the solution are explained to help eliminate defects from future castings. The contractions sustained in the process are also analyzed through dimensional analyses, comparing the compensation values assigned to actual measurements in castings.

This course, with the description of all the steps and materials used, as well as the analysis of the results should be understood and used as a methodology for manufacturing faucet prototypes.





## **Agradecimentos**

Ao Sr. Engenheiro Rui Neto, orientador deste trabalho no INEGI, agradeço o tratamento cordial, sempre com disponibilidade no acompanhamento e esclarecimento de dúvidas.

Ao Sr. Professor Jorge Lino, orientador deste trabalho na FEUP, agradeço o cuidado, atenção e apoio dado na realização desta dissertação.

Ao INEGI e seus colaboradores, nomeadamente aos elementos da equipa do CETECOFF, que contribuíram e sempre se mostraram disponíveis para a realização e apoio das tarefas experimentais, deixo aqui a uma palavra de apreço e agradecimento.

À minha família, em particular aos meus pais e irmão, e à Cátia agradeço-lhes por todo o carinho, compreensão e incentivo.

O autor deseja ainda expressar o seu agradecimento pelo financiamento do Projeto SAESCTN-PII&DT/1/2011 cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte (ON.2 - O Novo Norte), sob o Quadro de Referência Estratégico Nacional (QREN), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).



## Índice de Conteúdos

1	Introdução .....	1
1.1	Objetivos .....	1
1.2	Apresentação da instituição INEGI .....	1
1.3	Organização e temas abordados na dissertação .....	2
2	Revisão Bibliográfica .....	3
2.1	A torneira .....	3
2.1.1	Introdução .....	3
2.1.2	Função e componentes .....	6
2.1.3	Normas aplicadas .....	7
2.1.4	Produção em série de torneiras .....	7
2.2	Modelação e referências de mercado .....	9
2.2.1	Modelação 3D .....	9
2.2.2	Engenharia Inversa.....	10
2.3	Geração de modelo físico – protótipo .....	14
2.3.1	Protótipo.....	14
2.3.2	Fabricação aditiva .....	15
2.3.3	Fabricação subtrativa .....	20
2.3.4	Conversão direta vs. Conversão indireta de protótipos em peças metálicas .....	21
2.4	Fabricação do macho .....	23
2.5	Ceras .....	23
2.6	Processo de Cera Perdida.....	28
2.6.1	Introdução .....	28
2.6.2	Etapas do Processo.....	30
2.6.3	Sistema de gitagem .....	31
2.6.4	Criação da carapaça cerâmica .....	32
2.6.5	Descerificação .....	34
2.6.6	Sinterização .....	35
2.6.7	Fundição.....	35
2.6.7.1	Ligas de Latão.....	35
2.6.7.2	Defeitos de fundição associados ao processo de cera perdida.....	40
2.7	Tratamentos e acabamentos .....	53
2.8	Controlo de qualidade .....	55
3	Trabalho Experimental .....	65
3.1	Introdução .....	65
3.2	Modelação CAD 3D dos Protótipos .....	66
3.3	Método de conversão indireto.....	73
3.3.1	Estereolitografia (SL).....	73
3.3.2	Criação dos moldes de injeção da cera .....	76
3.3.3	Injeção de cera nos moldes .....	80
3.3.4	Integração de sistema de gitagem .....	84
3.3.5	Carapaças cerâmicas .....	88
3.3.6	Descerificação e sinterização .....	95

3.3.7 Vazamento da Liga.....	96
3.4 Método direto .....	102
3.4.1 Impressão de cera .....	102
3.4.2 Integração de sistema de gitagem.....	105
3.4.3 Carapaças cerâmicas.....	106
3.4.4 Descerificação e sinterização .....	108
3.4.5 Vazamento da Liga.....	108
4 Apresentação e análise dos resultados.....	111
4.1 Análise de defeitos de fundição nas peças vazadas.....	111
4.1.1 Peças vazadas provenientes da aplicação do método de conversão indireto.....	112
4.1.2 Peças vazadas provenientes da aplicação do método de conversão direto.....	114
4.2 Análise das contrações das peças vazadas.....	116
4.2.1 Contrações nas peças fundidas resultantes de modelos em cera injetados (método indireto).....	117
4.2.2 Contrações nas peças fundidas resultantes de modelos em cera impressos (método direto) .....	118
4.3 Análise de custos dos processos de fabrico de modelos em cera injetados vs. modelos em cera impressos .....	119
5 Conclusões .....	126
6 Trabalhos futuros.....	128
7 Bibliografia e referências .....	130
ANEXO A: Desenhos CAD das torneiras consideradas e modeladas (com cotas). ....	1
ANEXO B: Fichas com as características da máquina de estereolitografia – Viper SI2 – e de impressão de cera – ProJet 3510 CP - utilizadas.....	5

## Índice de Figuras

Figura 1 – Torneira utilizada no período da Roma Antiga.....	3
Figura 2 – Modelo típico de torneira de rosca.....	4
Figura 3 – Esquema da primeira torneira que utilizou a válvula de esferas.....	4
Figura 4 – Válvula misturadora com disco cerâmico.....	5
Figura 5 – Filtro integrado diretamente numa torneira.....	5
Figura 6 – Funcionalidades de torneiras contemporâneas.....	6
Figura 7 – Componentes de uma torneira genérica.....	6
Figura 8 – Esquematização demonstrativa do processo de fundição sob baixa pressão.....	8
Figura 9 – Etapas de obtenção de uma peça fundida em “areia verde”.....	9
Figura 10 – Sonda de digitalização por contacto.....	11
Figura 11 – Dispositivo de digitalização sem contato.....	11
Figura 12 – Falha na digitalização de pontos da superfície paralela ao eixo do laser.....	12
Figura 13 - Modelo CAD 3D obtido por digitalização.....	13
Figura 14 – Custos de alteração de projeto em diferentes etapas de desenvolvimento.....	14
Figura 15 – Elementos e princípio de funcionamento de um aparelho SLA.....	17
Figura 16 - Funcionamento de uma impressora por jato.....	19
Figura 17 – Molde de injeção de cera em silicone.....	22
Figura 18 - Molde em resina carregada com partículas de alumínio.....	22
Figura 19 - Efeito das cargas na contração volumétrica da cera.....	25
Figura 20- Máquina de injeção de cera pronta a injetar cera num molde.....	26
Figura 21 – Peça em cobre de 2850 A.C. produzida pelo processo de cera perdida.....	28
Figura 22 - Turbina fabricada pelo processo de cera perdida.....	29
Figura 23 - Diferentes etapas do processo de cera perdida.....	30
Figura 24 - Exemplificação de um sistema de gitagem utilizado no processo de fundição de cera perdida.....	31
Figura 25 - Evolução da espessura em função do nº de camadas.....	32
Figura 26 - Diagrama de fases Cu-Zn.....	36
Figura 27 - Propriedades mecânicas do latão em função do título fictício em cobre.....	39
Figura 28 - Esquematização e exemplo real de uma descontinuidade causada por falta de fusão.....	40
Figura 29 - Esquematização e exemplo real de um dano causado por um corte deficiente do gito.....	41

Figura 30 - Esquematização e exemplo real de uma cavidade .....	42
Figura 31 - Esquematização e exemplo real com poros devido à retenção de ar .....	43
Figura 32 - Esquematização e exemplo real das cavidades devido à presença de escória.....	43
Figura 33 – Esquematização e exemplo real de uma peça com uma fissura a quente.....	44
Figura 34 - Esquematização e exemplo real de uma peça com inclusões.....	45
Figura 35 - Esquematização e exemplo real de uma peça com inclusões cerâmicas.....	46
Figura 36 - Esquematização e exemplo real de uma peça com defeitos de excesso de metal .	47
Figura 37 - Esquematização e exemplo real de uma peça com defeitos derivados da fratura da carapaça.....	47
Figura 38 - Esquematização e exemplo real de uma peça com defeitos derivados do mau enchimento .....	48
Figura 39 - Esquematização e exemplo real de uma peça com defeitos derivados do abatimento da camada primária .....	49
Figura 40 - Esquematização e exemplo real de uma peça com defeitos designados por rabos de rato.....	50
Figura 41 - Esquematização e exemplo real de uma peça com defeitos devidos à contração da carapaça.....	50
Figura 42 - Esquematização e exemplo real de uma peça com defeitos designados derivados de contrações na área do gito .....	51
Figura 43 - Esquematização e exemplo real de uma peça com defeitos de contração na superfície.....	52
Figura 44 - Esquematização e exemplo real de uma peça com defeitos derivados das marcas do modelo em cera .....	53
Figura 45 - Esquematização do processo de eletrolise ocorrido na galvanoplastia .....	54
Figura 46 – Esquematização de um modelo de uma câmara de PVD .....	54
Figura 47 – Inspeção Visual de uma peça recorrendo a um equipamento auxiliar .....	56
Figura 48 – Peça magnetizada com partículas magnéticas na zona da fissura .....	57
Figura 49 - Esquematização das etapas de inspeção por líquido penetrante .....	58
Figura 50 - Esquematização dos três elementos base constituintes de um ensaio radiológico	59
Figura 51 - Esquematização de dois tipos de bobinas de inspeção e padrões do fluxo das correntes de Eddy geradas.....	60
Figura 52 – Esquematização do efeito de uma fissure no padrão do fluxo das correntes de Eddy num tubo .....	61
Figura 53 – Diagrama de blocos de equipamento de ultrassons .....	62
Figura 54 - Exemplo de um laboratório/equipamento para realização de metalografia .....	63
Figura 55 – Etapas alternativas percorridas para o processo de fabrico de protótipos de torneiras.....	66
Figura 56 - Desenho da torneira fornecido pela Cifial.....	67

Figura 57 – Esboço da torneira da Cifial com as alterações propostas .....	67
Figura 58 – Raios de concordância para evitar defeitos de fundição .....	68
Figura 59 – Criação do perfil do canal de gitagem em contato direto com a torneira .....	68
Figura 60 - Torneira modelada em CAD 3D.....	69
Figura 61 - Macho da torneira com impressos em CAD 3D.....	70
Figura 62 - Vista em corte da torneira oca modelada em CAD 3D.....	70
Figura 63 - Elementos de apoio utilizados na estereolitografia.....	71
Figura 64 - Tacos integrados no molde do macho.....	71
Figura 65 - Molde de torneira modelado em CAD 3D.....	71
Figura 66 - Molde do macho modelado em CAD 3D .....	72
Figura 67 - Modelo de torneira oca com gitagem completa modelado em CAD 3D.....	72
Figura 68 - Torneiras modeladas e consideradas para o processo de fabrico.....	72
Figura 69 - Parâmetros de exportação do ficheiro de modelação para estereolitografia.....	73
Figura 70 - Máquina Viper SI2 presente no INEGI .....	74
Figura 71 - Procedimento de limpeza dos modelos SL.....	74
Figura 72 - Banca para limpeza de modelos presente no INEGI .....	74
Figura 73 - Equipamento de pós-cura para peças em estereolitografia, presente no INEGI....	75
Figura 74 - Modelo em esterolitografia de metade da torneira .....	75
Figura 75 - Modelo SL de metade do macho .....	76
Figura 76 - Metades da torneira com tacos.....	76
Figura 77 - Resina Poliuretano e granalha de alumínio utilizadas .....	77
Figura 78 – Junção e mistura dos elementos constituintes que compõem o futuro molde .....	77
Figura 79 - Efeito de escada em estereolitografia com imagem real.....	78
Figura 80 - Polimento dos modelos SL para retirar efeito de escada.....	78
Figura 81 - Esquema de fabrico de moldes de resina com alumínio, por vazamento .....	79
Figura 82 - Vazamento da mistura para a criação da moldação do macho .....	80
Figura 83 - Injeção de cera solúvel no molde do macho .....	81
Figura 84 - Macho solúvel presente na cavidade moldante.....	82
Figura 85 - Colocação do macho em cera solúvel no molde da torneira.....	82
Figura 86 - Injeção da cera de modelo no molde de injeção de cera da torneira .....	83
Figura 87 - Modelo em cera da torneira com macho solúvel .....	83
Figura 88 - Modelos em cera: oco em cima e maciço em baixo .....	84
Figura 89 - Elementos que compõem o sistema de gitagem da torneira oca.....	85
Figura 90 - Sistema de gitagem integrado num modelo de torneira oca .....	85

Figura 91 - Varetas cerâmicas com 4,5 mm de diâmetro de secção fornecidas pela Zolern ...	89
Figura 92 - Imersão de modelo em trisol .....	92
Figura 93 - Imersão de modelo na primeira camada de barbotina.....	92
Figura 94 - Polvilhamento de material refratário sobre a primeira camada de barbotina.....	93
Figura 95 - Secagem da primeira camada .....	93
Figura 96 - Forno do INEGI utilizado na descerificação e sinterização de carapaças cerâmicas.....	95
Figura 97 - Remoção do gancho e corte com serra das superfícies cerâmicas da pia de vazamento e ventes .....	95
Figura 98 - Peças após processo de descerificação e sinterização .....	96
Figura 99 - Forno utilizado no pré-aquecimento das carapaças cerâmicas.....	96
Figura 100 - Forno de indução do INEGI.....	97
Figura 101 - Vazamento da liga de latão da Cifial nas carapaças cerâmicas.....	97
Figura 102 - Quebra da carapaça cerâmica nº 6 na zona do alimentador .....	98
Figura 103 - Resultados da fundição e posterior limpeza do modelo nº1.....	99
Figura 104 - Torneira nº 1 após remoção do macho cerâmico e corte do sistema de gitagem.....	101
Figura 105 - Modelo CAD 3D da torneira utilizado para a impressão de cera.....	102
Figura 106 - Parâmetros de exportação do ficheiro modelado para a impressão de cera .....	102
Figura 107 – Impressora tridimensional de cera ProJet 3510 CP .....	103
Figura 108 - Modelo impresso em cera com defeito de impressão, ainda com suportes (material branco).....	104
Figura 109 - Modelo impresso em cera da torneira pretendida .....	104
Figura 110 - Sistema de gitagem aplicado aos modelos impressos .....	105
Figura 111 - Sistema de gitagem integrado no modelo nº 7 .....	106
Figura 112 - Sistema de gitagem integrado no modelo nº 8 .....	106
Figura 113 - Preparação para a colocação das varetas e pasta cerâmica na carapaça do modelo nº 8 .....	107
Figura 114 - Aspeto final da carapaça do modelo nº7 após aplicação das oito camadas cerâmicas.....	108
Figura 115 – Latão, contido no cadinho, a ser fundido no forno de indução do INEGI.....	108
Figura 116 - Resultados da fundição e posterior limpeza do modelo nº7.....	109
Figura 117 - Resultados da fundição e posterior limpeza do modelo nº8.....	109
Figura 118 – Fotos de peça vazada nº1 após corte de gito.....	112
Figura 119 - Fotos de peça vazada nº2 e seus defeitos .....	113
Figura 120 - Defeito presente na peça nº3 provocado pela presença de escória.....	113



Figura 121 - Modelo nº4 e respetivo defeito .....	114
Figura 122 - Peça nº7 como material vazado na zona oca .....	115
Figura 123 - Defeitos presentes na peça nº8 provocado pela falha da carapaça .....	115
Figura 124 - Referências das cotas escolhidas para avaliar a contração das peças vazadas ..	116
Figura 125 - Custos de produção em função do nº de modelos injetados em cera.....	122
Figura 126 – Custos de produção em função do nº de modelos impressos em cera .....	124
Figura 127 - Gráfico comparativo de Conversão indireta vs. Conversão direta para diferentes numeros de modelos .....	125



**Índice de Tabelas**

Tabela 1 – Normas referentes a torneiras sanitárias .....	7
Tabela 2 – Características típicas da resina líquida fotopolimerizável .....	16
Tabela 3 – Características típicas da resina fotopolimerizável endurecida e após cura de 90 minutos .....	18
Tabela 4 - Propriedades típicas das ceras utilizadas na impressão tridimensional.....	19
Tabela 5 - Composições típicas dos modelos em cera .....	25
Tabela 6 - Critérios de seleção das ceras .....	26
Tabela 7 - Características de alguns materiais refratários .....	33
Tabela 8 - Temperaturas de pré-aquecimento das carapaças consoante a liga.....	35
Tabela 9 - Contração aproximada de diferentes ligas após vazamento .....	39
Tabela 10 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação das descontinuidades causada por falta de fusão.....	41
Tabela 11- Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação dos danos de corte.....	42
Tabela 12 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação de bolhas ou poros .....	42
Tabela 13 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação de defeitos causados por retenção de ar .....	43
Tabela 14 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação dos defeitos causados pela escória .....	44
Tabela 15 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação de fissuras a quente....	45
Tabela 16 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação de inclusões.....	45
Tabela 17 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação de defeitos de inclusões cerâmicas .....	46
Tabela 18 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação de defeitos de excesso de metal devido a falha da carapaça .....	47
Tabela 19 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação de defeitos derivados da fratura da carapaça .....	48
Tabela 20 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação de defeitos derivados do mau enchimento.....	48
Tabela 21- Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação de defeitos derivados do abatimento da camada primária .....	49
Tabela 22 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação de defeitos rabo de rato .....	50
Tabela 23 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação de defeitos derivados da contração da carapaça.....	51

Tabela 24 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação devido a contrações na área do gito .....	52
Tabela 25 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação devido a contrações na superfície .....	52
Tabela 26 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação de defeitos derivados de marcas do modelo em cera .....	53
Tabela 27 - Características das ceras utilizadas na injeção.....	81
Tabela 28 - Condições de injeção das ceras nos moldes.....	81
Tabela 29 - Referências dos modelos injetados em cera com sistema de gitagem.....	86
Tabela 30 - O sistema de gitagem integrado em cada modelo.....	87
Tabela 31 - Barbotina utilizada na primeira camada - SZ .....	88
Tabela 32 - Barbotina para restantes camadas - SSF .....	88
Tabela 33 - Composição da pasta cerâmica .....	89
Tabela 34 - Procedimento de criação das camadas cerâmicas para o modelo nº 1.....	90
Tabela 35 - Procedimento de criação das camadas cerâmicas para o modelo nº 2.....	91
Tabela 36 - Procedimento de criação das camadas cerâmicas para os modelos nº 3, 4, 5 e 6	91
Tabela 37 - Carapaças construídas (imagens respeitantes após descerificação).....	94
Tabela 38 - Condições de vazamento das carapaças referentes aos modelos injetados .....	98
Tabela 39 - Peças vazadas após granalhagem.....	100
Tabela 40- Referências dos modelos impressos em cera com sistema de gitagem .....	105
Tabela 41 - Procedimento de criação das camadas cerâmicas para os modelos nº 7 e 8.....	107
Tabela 42- Condições de vazamento das carapaças referentes aos modelos impressos .....	109
Tabela 43 - Defeitos detetados na torneira com o modelo nº2 .....	112
Tabela 44 - Defeitos detetados na torneira com o modelo nº4 .....	114
Tabela 45 - Defeitos detetados nas torneiras com o modelo nº7 e 8.....	115
Tabela 46 - Cotas de referência do modelo CAD da torneira .....	116
Tabela 47 - Contrações da torneira maciça obtida através do modelo em cera injetada .....	117
Tabela 48 – Contrações médias das torneiras ocas obtidas através dos modelos em cera injetada.....	118
Tabela 49 - Contrações médias das torneiras ocas obtidas através dos modelos em cera impressa .....	119
Tabela 50 - Custos estimados da modelação CAD 3D dos diferentes elementos de uma torneira .....	120
Tabela 51 - Custos estimados da estereolitografia da torneira e diferentes elementos de apoio.....	120
Tabela 52 - Custos estimados de pós-cura e limpeza.....	120

Tabela 53 - Custo de produção dos moldes de injeção de cera (para torneira e macho).....	121
Tabela 54 - Custos da injeção de cera (cerita e solúvel) .....	121
Tabela 55 - Custos de remoção do macho solúvel .....	121
Tabela 56 - Custos totais de produção de um modelo em cera pelo método de conversão indireto.....	122
Tabela 57 – Impressão 3D de modelo em cera.....	123
Tabela 58 – Limpeza e remoção dos suportes .....	123
Tabela 59 - Custos totais de produção de um modelo em cera pelo método de conversão direto.....	124
Tabela 60 - Custos adicionais para a obtenção de um modelo em latão .....	125



## **1 Introdução**

### **1.1 Objetivos**

A presente dissertação tem como principal objetivo desenvolver uma metodologia que permita obter protótipos de torneiras, pelo processo de fundição de cera perdida. Decorrentes deste objetivo principal, surgiram objetivos de estudo e experimentais.

Relativamente aos objetivos de estudo são essencialmente conhecer as origens das torneiras até aos tempos de hoje, entender a composição e materiais destas peças presentes no nosso quotidiano e investigar os processos de fabrico que as criam, nomeadamente, todo o processo de desenvolvimento e produção de protótipos pelo processo de cera perdida.

Os objetivos experimentais prendem-se sobretudo com a implementação de um conjunto de soluções pensadas para a produção de protótipos, através do processo de cera perdida. Essas soluções passam pela aplicação de métodos de conversão direta ou indireta para a materialização de modelos de torneira em cera. Pretende-se obter, numa liga de latão fornecida pela empresa Cifial, protótipos maciços e ocos de torneiras. Esses protótipos ocos têm uma geometria exigente sob o ponto de vista de fundição, devido ao facto de possuírem secções interiores com uma área diminuta e simultaneamente, essa área estender-se ao longo de um elevado comprimento. Procurar-se-á definir e corrigir eventuais defeitos decorrentes do processo. Finalmente, analisar os custos e identificar a solução mais apropriada, consoante o número de protótipos que se pretende alcançar. Através dessa análise, o percurso pode ser entendido como um guia ou metodologia para obter protótipos de torneiras.

### **1.2 Apresentação da instituição INEGI**

O presente projeto foi realizado no Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial – INEGI.

Esta organização, definida como uma associação privada sem fins lucrativos e com estatuto de “utilidade pública”, teve origem no Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (DEMEGI) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) no ano de 1986.

Sendo um organismo de elo entre a Universidade e a Indústria, esta tem como objetivos principais:

- Investigação, desenvolvimento e transferência de tecnologia para as empresas de modo a fomentar a competitividade da indústria nacional;
- Formação nas áreas de conceção e projeto, materiais, produção, energia, manutenção, gestão industrial e ambiente.

O INEGI tem como ambição tornar-se numa instituição de referência, não só a nível nacional, mas também a nível mundial, tornando-se num elemento pertinente no Sistema Científico e Tecnológico Europeu.

O INEGI é uma Unidade de Investigação do Laboratório Associado de Energia, Transportes e Aeronáutica, que agrega também o Instituto de Engenharia Mecânica - Polo IST, o Instituto de Engenharia Mecânica - Polo FEUP, o Centro de Ciência e Tecnologia em Aeronáutica e Espaciais do IST e o Laboratório de Aeronáutica Industrial da Universidade de Coimbra. O Instituto mantém também relações com outras Unidades de Investigação nomeadamente o Centro de Estudos de Energia Eólica e Escoamentos Atmosféricos e o Centro de Estudos de Fenómenos de Transporte.

### **1.3 Organização e temas abordados na dissertação**

A presente dissertação encontra-se dividida em 4 partes:

- Revisão bibliográfica
- Metodologia experimental
- Apresentação e discussão dos resultados
- Conclusões

Numa primeira fase, a revisão bibliográfica explora a história, os componentes constituintes e suas funções e os processos de fabrico atuais das torneiras. Em seguida são descritos diferentes processos de geração de modelo físico, centrando a atenção naqueles que direta ou indiretamente produzam modelos em cera, necessários ao processo de fundição em estudo. Esse processo de fundição, as suas etapas e particularidades são também descritas, bem como os defeitos inerentes, suas causas e soluções. É também abordada a forma de detetar esses defeitos, o denominado controlo de qualidade. Finalmente são descritos aos acabamentos habitualmente utilizados nas torneiras, que permitam obter uma peça finalizada.

A metodologia experimental pretende descrever todas as etapas e opções tomadas, desde a modelação CAD 3D, passando pelo processo de obtenção direta e indireta dos modelos em cera, até à fase final de realização dos vazamentos para produzir torneiras maciças e ocas, na liga pretendida.

A apresentação dos resultados diz respeito sobretudo à qualidade das peças vazadas e à análise e discussão de defeitos e contrações das mesmas. São apresentadas neste capítulo as diferenças económicas entre os dois percursos tomados para o fabrico dos protótipos de torneiras, sendo feito um estudo do número de peças que é necessário produzir, para que um método seja considerado mais aconselhável que o outro.

Na última fase, são apresentadas as conclusões do presente trabalho e sugeridos trabalhos futuros.



## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 A torneira

#### 2.1.1 Introdução

O surgimento da primeira torneira remonta à Antiguidade. Pensa-se que em Creta, 1700A.C., já existiam sistemas de canalização e torneiras de mármore, ouro e prata, que abasteciam as fontes públicas. Também no período da Roma Antiga, os Romanos utilizavam os sistemas de canalização e as torneiras para transportar a água, não só para os banhos públicos, como também para casas, cisternas e fontes (How Products Are Made: Faucet).

O funcionamento da torneira, embora simples, era eficaz para os requisitos da época: um cilindro, com um orifício perpendicular ao seu eixo, que era inserido no cano. A água, então, passava ou não pelo orifício, conforme a posição do cilindro (fig. 1). A torneira de encaixe foi usada durante toda a Idade Média.



**Figura 1 – Torneira utilizada no período da Roma Antiga (ArteHistoria)**

No século XIX, a distribuição da água passou a ser feita com o auxílio de bombas a vapor, o que, devido às pressões decorrentes, exigia outro tipo construtivo de torneira. Inventada em Inglaterra em meados de 1800 por Thomas Gryll, a torneira de rosca provou ser capaz de se adaptar a este tipo de fornecimento. Semelhante às torneiras modernas, esta possuía um parafuso que forçava um anel vedante contra uma superfície plana, interrompendo o fluxo da água (fig. 2).



**Figura 2 – Modelo típico de torneira de rosca (Sstpl)**

Durante muitos anos e até meados de 1940, as torneiras tinham dois manípulos, um para a água fria e outro para a quente. Em 1937, precisamente numa dessas torneiras, Al Moen estava a lavar-se quando a água, até então tépida, repentinamente aquece, causando-lhe desconforto. Num momento de inspiração, gerado pela surpresa e incómodo, Al Moen iniciou o projeto para desenhar uma torneira que, apenas com um manípulo, regulasse o caudal de água fria e quente simultaneamente. Após vários *designs* e tentativas de aceitação, entre 1940-45 foram comercializadas as primeiras torneiras idealizadas por si. No entanto, Moen não era o único preocupado com aperfeiçoamentos das torneiras existentes na época. Em 1945, focado em melhorar este tipo de torneiras, Landis H. Perry desenha uma válvula de esferas que, anos mais tarde, pela mão de Alex Manoogian que entretanto tinha adquirido a patente, viria a originar a primeira torneira Delta (fig. 3). Esta foi um sucesso assinalável com um volume de vendas de um milhão de dólares em 1958.



**Figura 3 – Esquema da primeira torneira que utilizou a válvula de esferas(Delta)**

Cerca de duas décadas depois, Wolverine Brass patenteou um disco cerâmico para o controlo do fluido. Estes discos vieram-se a revelar mais resistentes ao desgaste e com um melhor controlo, do que os cartuchos de borracha usados até então, sendo utilizados em massa até aos dias de hoje (fig. 4).



**Figura 4 – Válvula misturadora com disco cerâmico (WolverineBrass)**

Entre as inovações relativamente recentes destacam-se a inclusão de filtros para reduzir as percentagens de cloro, chumbo e micróbios, entre outros elementos indesejáveis que se encontram presentes na água canalizada (fig. 5).



**Figura 5 – Filtro integrado diretamente numa torneira (Moen)**

Outra área que contribuiu sobretudo para a durabilidade das torneiras foi a introdução de revestimentos por galvanoplastia ou PVD (deposição física de vapor), criando uma camada/barreira sobre a superfície da torneira.

Torneiras com elementos extensíveis e torneiras eletrónicas com vários elementos sensoriais, como infravermelhos e controlo por toque, são outros exemplos que se devem destacar no campo da inovação e funcionalidade (fig. 6).



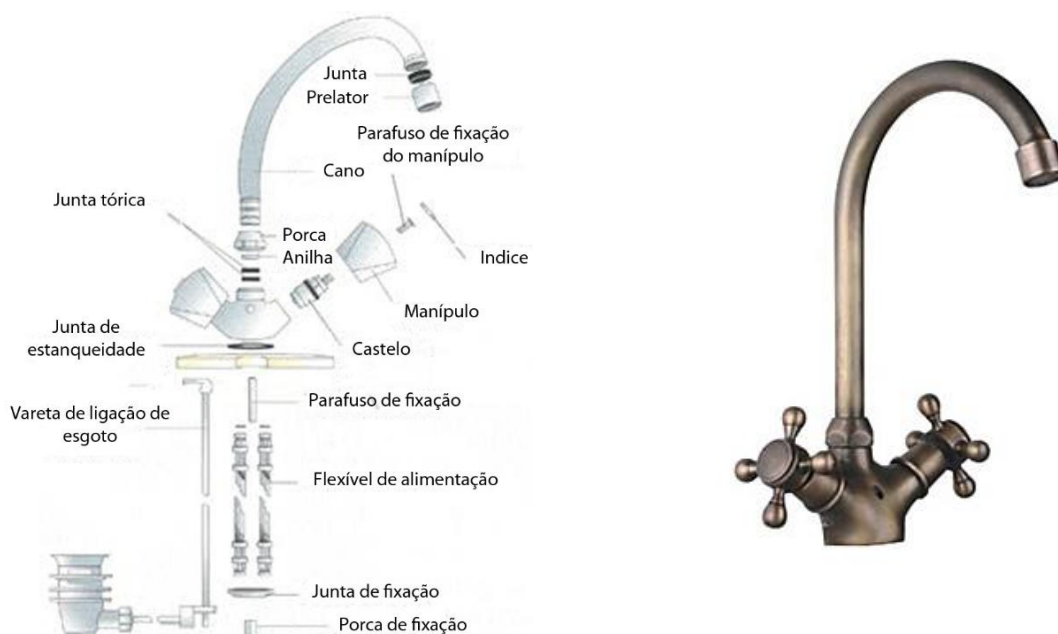
**Figura 6 – Funcionalidades de torneiras contemporâneas (Brizo)**

Em termos construtivos e de *design* existe sempre o desafio e tendência em tentar produzir torneiras com geometrias que, muito embora possam não aparentar ser de grande complexidade, são exigentes sob o ponto de vista de materialização de forma. Este ponto é de resto um dos grandes impulsionadores deste projeto que visa produzir protótipos de torneiras.

### 2.1.2 Função e componentes

Em termos funcionais, a torneira é essencialmente uma válvula que serve de elemento de ligação entre o reservatório ou abastecimento e o utilizador final. Segundo a sua definição é uma “peça tubular provida de uma espécie de chave que permite fechar, abrir ou regular o escoamento de um líquido ou gás contido num recipiente ou disponível numa canalização”.

Há uma imensa diversidade de torneiras e de soluções construtivas. Por forma a ter uma noção da constituição de uma típica torneira, é apresentada na figura 7, uma torneira de cozinha genérica com os componentes e um exemplo real ao seu lado direito.



**Figura 7 – Componentes de uma torneira genérica (LeroyMerlin)**

Como é possível observar, uma torneira genérica é constituída por diversas partes, cada uma com o seu propósito, sendo possível distinguir diferentes categorias funcionais.

No âmbito deste trabalho, as torneiras que se pretende desenvolver são vocacionadas para o uso doméstico ou público, sendo portanto o expectável que o fluído seja água. Dentro desse grupo de torneiras estão incluídas, mais concretamente, as torneiras para cozinhas e casas de banho. É também importante referir que este trabalho, nomeadamente o experimental, visa fabricar protótipos de corpos de torneira, ou seja, produzir os elementos de forma de uma torneira. Todos os outros elementos devem ser normalizados e facilmente adaptáveis aos protótipos, assim que estes estejam finalizados, após acabamento.

### 2.1.3 Normas aplicadas

As torneiras, como a generalidade dos elementos criados, para serem fabricadas e comercializadas têm obrigatoriamente de se reger por um conjunto de normas, não só geométricas, mas também de composição (matéria de que são feitas), acústicas e de volume de água por minuto.

Estas regras ou normas podem variar consoante o país, no entanto tendem a convergir em certos parâmetros, como a conservação de água, ruído e material constituinte.

Na Tabela 1 são referidos alguns dos códigos das normas referentes a torneiras sanitárias, com respetivos títulos.

**Tabela 1 – Normas referentes a torneiras sanitárias**

<b>Código da norma</b>	<b>Título da norma</b>
NP EN 200	Torneiras sanitárias torneiras simples e misturadores para os sistemas de alimentação de água dos tipos 1 e 2
EN 246	Sanitary tapware – General specifications for flow rate regulators
EN 248	Sanitary tapware – General technical specifications for electrodeposited nickel chrome coatings
EN 1112	Sanitary tapware – Shower outlets for sanitary tapware for water supply system of type 1 and type 2 – General technical specification
EN 1113	Sanitary tapware. Shower hoses for sanitary tapware for water supply systems of type 1 and type 2. General technical specification

### 2.1.4 Produção em série de torneiras

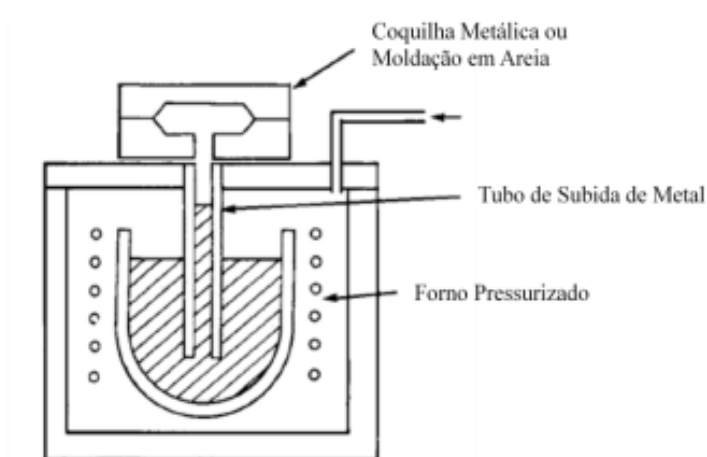
A produção industrial e sem série de torneiras pode ser conseguida através de diferentes processos alternativos, destacando-se os seguintes

- Vazamento em coquilha (por gravidade, rotativa ou baixa pressão)
- Vazamento em areia verde
- Maquinagem (de diferentes componentes que são posteriormente soldados)

### Vazamento em coquilha

Existem vários métodos para efetuar o vazamento em coquilha sendo um deles a fundição sob baixa pressão, método definido como fundição com moldações permanentes. É de salientar que as cavidades das peças vazadas são normalmente realizadas através de machos simples e removíveis em metal. Porém, no caso do fabrico de torneiras, os machos são normalmente feitos em areia, processo chamado como fundição em moldações semi-permanentes (Ferreira 1999).

Na fundição sob baixa pressão, a moldação permanente é posicionada num dispositivo de fundição acima de uma câmara selada que contém o metal fundido, como se pode observar na figura 8.



**Figura 8 – Esquematização demonstrativa do processo de fundição sob baixa pressão (Marques 2010)**

Um gito tubular de enchimento estende-se desde o molde até ao banho de metal em fusão. A peça é obtida pressurizando a câmara, forçando o metal a entrar no molde. O metal pressurizado no canal tubular de enchimento atua como um alimentador durante a fase de solidificação. O método de enchimento é feito sob baixa pressão, decorrendo durante um ciclo automatizado de curta duração e a temperaturas relativamente baixas, quando comparado com o processo de vazamento por gravidade. A rápida solidificação, associada a uma baixa pressão, origina peças vazadas com grão fino, pequenas dendrites e propriedades mecânicas superiores (Ferreira 1999).

### Vazamento em “areia verde”

Os processos de fundição envolvem o vazamento de ligas metálicas em moldações resistentes a temperaturas acima das temperaturas de fusão dos metais. Devido aos facto destas

moldações metálicas não resistirem, no tempo, ao desgaste erosivo e à fadiga térmica, a maioria das peças são vazadas em moldações obtidas por compactação de uma mistura de areia com aglomerantes, aditivos e uma certa percentagem de humidade, designadas por moldações em “areia verde”.

Para se obter o molde para peça a ser vazada (forma negativa do volume da peça) tem de se fazer uma moldação em material refratário compactado por reprodução da forma de um modelo. O modelo tem que ter em geral a forma da peça mas com uma escala geométrica ligeiramente superior para compensar o fator de contração metálico e deve ter sobresspessura nas zonas de maquinagem.

De um modo geral a caixa de moldação é construída em duas partes: caixa superior e caixa inferior, divididas pela denominada superfície de apartação (Ferreira 1999).

Na figura 9 é apresentada uma breve esquematização da sequência de moldação por compactação de “areia verde” sobre modelos.

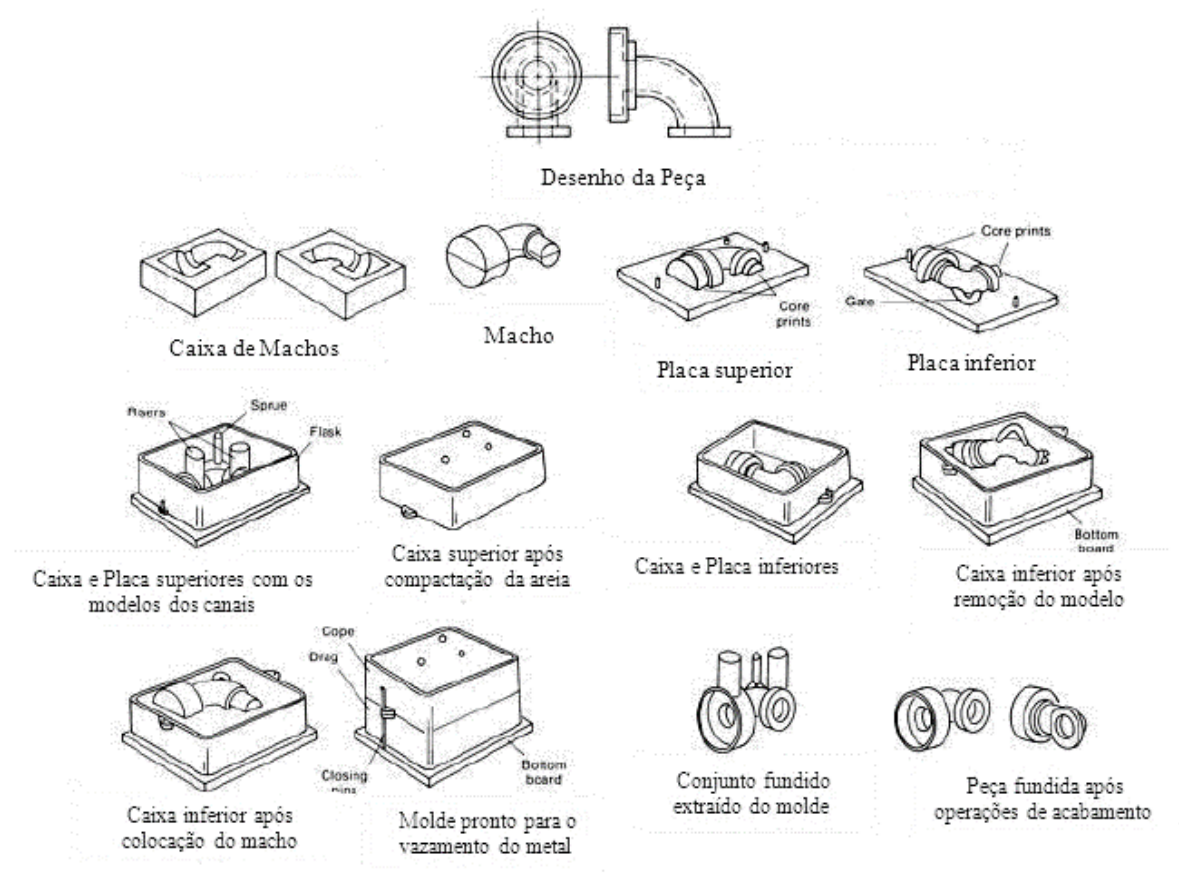


Figura 9 – Etapas de obtenção de uma peça fundida em “areia verde” (Verran)

## 2.2 Modelação e referências de mercado

### 2.2.1 Modelação 3D

É cada vez maior a importância da utilização de *software* de modelação 3D, na fase de desenvolvimento do produto. A modelação em 3D é bastante utilizada em diversas indústrias,

pois é uma ferramenta extremamente útil para a representação gráfica tridimensional de equipamentos e/ou produtos, para a simulação de operação e controlo de processos industriais.

A modelação em *software* CAD 3D é, em vários processos de fabrico, um elemento intrínseco do próprio desenvolvimento do produto. Não só permitem simular diferentes solicitações (térmicas, de fadiga, estruturais), como possuem os recursos necessários para definir a produção de peças (criação de ferramentas, moldes, entre outros).

No caso concreto da produção de protótipos, como por exemplo a estereolitografia ou a impressão 3D, são utilizados como a ferramenta que vai dar início à geração de um modelo físico.

Por estes motivos a modelação CAD 3D é um instrumento que irá ser utilizado no processo de produção de protótipos de torneiras.

### 2.2.2 Engenharia Inversa

Num mercado globalizado e altamente competitivo é obrigatório estar ao corrente do que existe e é feito, tanto a nível de produtos como de processos, por empresas concorrentes. Só adquirindo este conhecimento é que se torna possível compreender se se está atualizado a nível de *design* de produto e funcionalidades do mesmo. Neste sentido, o primeiro cliente ou interessado de um produto de uma empresa deve ser o concorrente direto.

A ferramenta que auxilia a obtenção das características, mais particularmente as geométricas, de um determinado produto é a denominada engenharia inversa.

Assim, o processo de duplicação de uma peça ou produto existente, sem ter acesso a desenhos, especificações técnicas, ou modelo CAD, é definido como engenharia inversa. Também pode ser definida como o processo de obter um modelo CAD através da digitalização de pontos da superfície da peça ou produto (Raja e Fernandes 2007).

Na realidade, a engenharia inversa tem outras funções e não se limita a cópia concorrencial. A produção de sobressalentes para equipamento obsoleto, fabricação de cópias de peças obtidas com ferramentas velhas, reformulação de produtos próprios que podem assim reaparecer com um novo aspeto, são alguns exemplos em que se parte de produtos sólidos já existentes, para criar novos produtos (Alves 2001). Outra aplicação decorrente da aplicação desta tecnologia é a capacidade de comparar uma peça manufaturada com a peça modelada em CAD 3D, funcionando a engenharia inversa, neste caso, como um elemento de controlo de qualidade.

Depreende-se pois que a utilização desta ferramenta também constitui uma vantagem, não só pela obtenção da forma geométrica de um produto, mas também pela rapidez que induz na sua produção e controlo de qualidade, sendo por isso importante a sua referência, no âmbito deste trabalho, nomeadamente na produção de protótipos de torneiras.

O processo de engenharia inversa pode ser decomposto em três fases (Raja e Fernandes 2007):

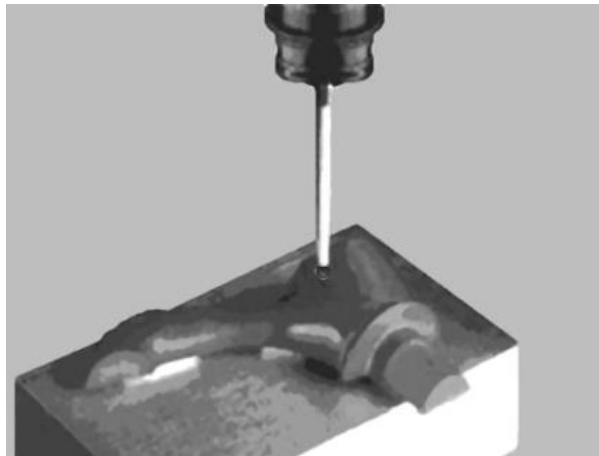
- **Digitalização**

Esta fase engloba a escolha da técnica mais apropriada de digitalização, de acordo com a peça pretendida, a sua preparação e a própria digitalização, para extrair a informação que descreve todas as características geométricas da peça.



Nesta fase de digitalização 3D, podem ser usados dois tipos de equipamento:

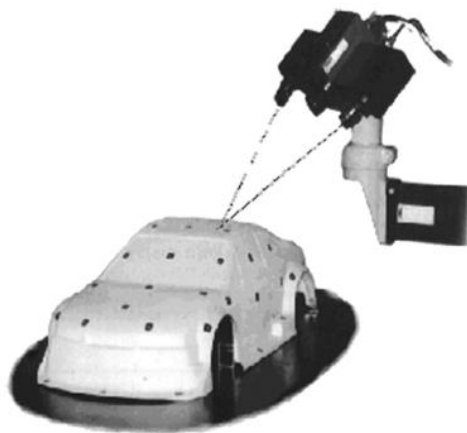
- Digitalização por contacto (fig. 10)



**Figura 10 – Sonda de digitalização por contacto  
(McDonald, Ryall, e Wimpenny 2001)**

Estes equipamentos possuem sondas de contacto que percorrem automaticamente, ponto a ponto, os contornos da superfície da peça a digitalizar. Têm como principal vantagem a elevada precisão, com tolerâncias de 0,01 mm (Raja e Fernandes 2007). Com esta elevada precisão, surge um dos inconvenientes deste processo - o tempo prolongado que uma peça demora a ser digitalizada (Alves 2001). Outra limitação da utilização desta tecnologia é decorrente do facto de neste processo existir contacto físico com a peça a digitalizar. Nesse sentido, materiais flexíveis, como por exemplo borracha, estão excluídos no que diz respeito à sua digitalização por este meio (Raja e Fernandes 2007).

- Digitalização sem contacto (fig. 11)

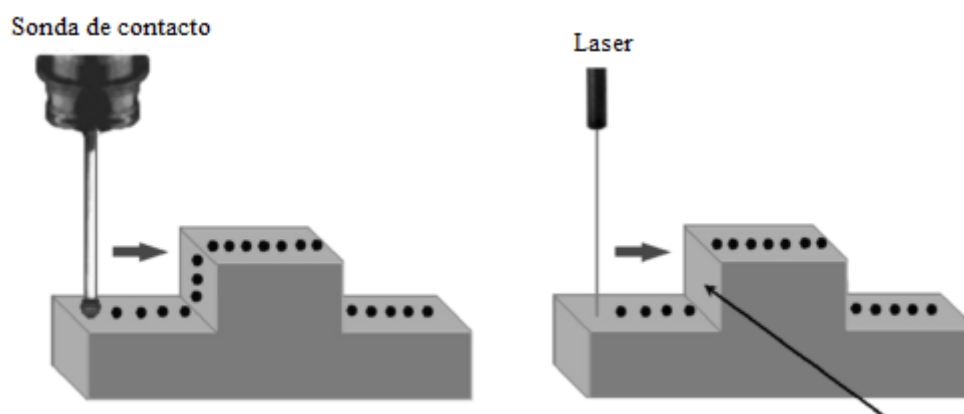


**Figura 11 – Dispositivo de digitalização sem contato  
(McDonald, Ryall, e Wimpenny 2001)**

Nesta variante de digitalização – sem contacto físico com a peça a digitalizar – os sensores utilizados podem ser do tipo laser, ótico ou dispositivo de carga acoplada (Raja e Fernandes 2007).

Embora sejam bastante mais expeditos do que os equipamentos de digitalização por contacto devido a digitalizar por varrimento em vez de o fazer ponto a ponto (Alves 2001), apresentam limitações quando comparadas a este (Raja e Fernandes 2007):

- Tolerâncias maiores da ordem de 0,025 até 0,2 mm;
- Geometrias com superfícies paralelas ao eixo do laser não são corretamente interpretadas (fig. 12);



**Figura 12 – Falha na digitalização de pontos da superfície paralela ao eixo do laser.**  
(McDonald, Ryall, e Wimpenny 2001)

- Como utilizam luz para proceder à captura das informações da geometria da peça, estão dependentes do tipo material da peça a ser digitalizada. Assim, pode ser necessário aplicar um revestimento na peça, para que esta possa ser digitalizada.

Estas limitações restringem a utilização desta tecnologia, sobretudo quando a importância da precisão da digitalização se sobrepõe a velocidade da captura de dados.

### • **Processamento de pontos**

O resultado da digitalização traduz-se numa nuvem de pontos. Sendo relativamente fácil de gerar, em oposição a superfícies ou volumes, esta nuvem de pontos é a forma mais básica de informação geométrica tridimensional, mas também a que corresponde à informação dimensional mais precisa. Isto porque, qualquer modelação subsequente, no sentido de criar superfícies a partir dos pontos que proporcionará uma informação mais completa, se tratará de uma aproximação do modelo real (Smith e Claustre 2004).

O processamento de pontos, corresponde à interpretação feita pelo *software* da máquina e compreende a importação da nuvem de pontos, redução do ruído e do número de pontos da informação coletada. Essa interpretação feita por *software* obedece a uma série de filtros que o utilizador do equipamento pode controlar (Raja e Fernandes 2007).

Esta fase permite também a integração de diferentes digitalizações, com diferentes ângulos e orientações, da mesma peça, de forma a criar um modelo mais completo, que doutra maneira

não seria possível. O resultado final resume-se a um ficheiro composto por uma nuvem de pontos (Raja e Fernandes 2007).

- **Desenvolvimento e aplicação do modelo geométrico gerado**

A geração de um modelo CAD a partir de dados de pontos é provavelmente a fase mais crítica da engenharia inversa, uma vez que são necessários algoritmos extremamente capazes para representar e modelar a informação tridimensional, descrita pela nuvem de pontos. Adicionalmente, como referido anteriormente, a criação de superfícies a partir de pontos é um processo subjetivo e uma aproximação do modelo real (Raja e Fernandes 2007).

Assim como os equipamentos de fabrico aditivo e subtrativo diminuem drasticamente o tempo de obtenção de um protótipo, a partir de um modelo CAD, estes equipamentos de digitalização reduzem substancialmente o tempo de obtenção de um modelo em CAD, a partir de um modelo físico (Raja e Fernandes 2007).

Aparentemente o uso de engenharia inversa para obtenção de um modelo CAD é morosa, mas normalmente é muito mais rápida que uma modelação de raiz, de um modelo com formas complexas. O modelo representado na figura 13 foi digitalizado e criado em menos de 8 horas. A modelação de raiz do mesmo modelo estima-se que demoraria duas semanas (Smith e Claustre 2004).



**Figura 13 - Modelo CAD 3D obtido por digitalização  
(Smith e Claustre 2004)**

A partir do modelo CAD 3D obtido é possível replicá-lo ou editá-lo consoante a necessidade do processo de desenvolvimento. Pode ainda ser utilizado para estudos de CAE, aerodinâmica e verificações de conformidade, nomeadamente, comparação das formas dos modelos 3D com as da peça produzida (Alves 2001).

Nesse sentido é importante dispor de ferramentas que auxiliem o conhecimento em detalhe desses produtos e processos.

## 2.3 Geração de modelo físico – protótipo

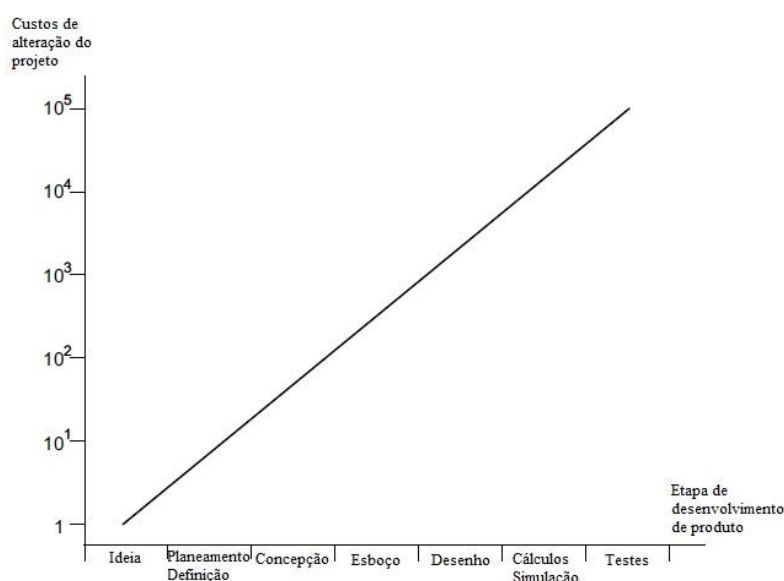
### 2.3.1 Protótipo

Considera-se que o desenvolvimento de um novo produto foi bem-sucedido quando se obteve a melhor qualidade possível, ao menor preço e da forma mais rápida (Gebhardt 2003). As fases iniciais do desenvolvimento de um produto têm especial relevância nesse mesmo sucesso, bem como no êxito desse produto no mercado.

A utilização de um protótipo permite testar e visualizar o *design* de um produto, antes de este ser realmente produzido. Neste sentido, os protótipos proporcionam não só um auxílio para identificar e avaliar alguns aspetos construtivos do modelo, como também simular, dentro de determinadas limitações, a integração da futura peça no contexto em que se insere (Chung 2009).

Graças à natureza física e tangível dos protótipos, a sua utilização também oferece fácil interpretação do modelo, para indivíduos, que, tendo interesse direto no produto, não possuam eventualmente conhecimentos específicos acerca de desenvolvimento de produto, permitindo assim que vejam e reportem eventuais sugestões (Chung 2009). Paralelamente, a realização rápida de protótipos pode constituir um suporte às ações de marketing, sendo um precioso auxiliar à comercialização dos produtos (Alves 2001).

Uma das principais aplicações dos protótipos é na implementação de novos projetos, quando estes se encontram numa fase embrionária ou mesmo avançada de conceção, e antes do elevado investimento de fabricar uma ferramenta para a sua produção. Testar um protótipo funcional nessa altura dá a oportunidade de detetar erros de projeto quando os custos de alterações são ainda baixos (Alves 2001). Assim, pela observação do gráfico presente na figura 14, é possível descortinar a magnitude dos custos de alterações ao projeto, nas diferentes etapas de criação de um novo produto. Quanto mais tarde forem necessárias e feitas alterações, maior o custo que acarretará, sendo que, pela análise do gráfico, esse aumento é exponencial, consoante se progride do desenvolvimento do produto.



**Figura 14 – Custos de alteração de projeto em diferentes etapas de desenvolvimento (Gebhardt 2003)**

Naturalmente, o gráfico tem continuidade para fases posteriores do desenvolvimento do produto, até chegar à comercialização, sendo o agravamento dos custos semelhante.

Na eventualidade de se achar que o custo de erros na conceção e desenvolvimento do produto está extrapolado da realidade, basta pensar em exemplos como a alteração de um equipamento ou ferramenta construídos especificamente para a produção de um produto, ou em casos extremos, por exemplo, a recolha de automóveis à marca, por erros de conceção de uma peça (Gebhardt 2003).

Resumindo, a criação de um protótipo é importante por dois fatores - acelera o desenvolvimento de um produto e auxilia a deteção de eventuais erros de conceção.

O protótipo, para além das importantes funções mencionadas até aqui, pode ter também um papel indissociável de um determinado processo de fabrico. No processo de fundição por cera perdida, a criação de um molde de injeção de modelos em cera, pode passar pela prévia criação de um protótipo, que vai dar a forma desejada da cavidade, e ser assim replicado em cada modelo em cera.

### **2.3.2 Fabricação aditiva**

A fabricação aditiva, tradicionalmente designada por prototipagem rápida, é caracterizada pela geração de um modelo físico, através de modelação tridimensional de um modelo virtual, sendo este materializado pela adição sucessiva de camadas de material.

A grande vantagem do fabrico aditivo consiste na rapidez e na possibilidade de se obterem protótipos com características dimensionais, geométricas e de acabamento superficial, muito semelhantes às futuras peças (Neto, Lino, e da Rocha).

Apesar de ser um processo que engloba uma diversidade de soluções, todas elas respeitam os seguintes princípios, de forma a serem consideradas um processo de fabricação aditiva (Alves 2001):

- O processo de modelação tem de ser baseado em CAD 3D;
- O processo de obtenção do protótipo deve demorar apenas entre algumas horas a poucos dias, dispensando a utilização de pessoal especializado;
- O modelo ser obtido por adição de material.

Como referido, existe uma considerável variedade de processos inseridos na noção de fabricação aditiva, sendo estes referidos e explicados exhaustivamente nas referências (Wohlers 2013; Grenda 2009; Gebhardt 2003; Alves 2001). De forma sucinta, alguns dos tipos de fabrico aditivo mais difundidos são:

- Estereolitografia (SL) – o protótipo é criado por fotopolimerização de uma resina líquida, através da incidência de luz ultravioleta.
- Sinterização seletiva por laser (SLS) – pós muito finos de materiais poliméricos, compósitos de matriz polimérica, metais revestidos a termoplástico ou ligas metálicas são ligados entre si por varrimento de um feixe laser.
- Impressão tridimensional (TDP) – distribuição de uma camada uniforme de pó sobre a superfície de trabalho, seguindo-se a deposição, por intermédio de finos jatos, de um ligante líquido sobre os pontos que correspondem ao corte local da peça.

- Modelação por extrusão de plástico (FDM) – um fio de material termoplástico é extrudido e depositado em camadas muito finas, unindo-se a camada depositada à camada anterior durante a solidificação.
- Impressão de cera – o funcionamento é como que uma simbiose entre o processo FDM e TDP, existindo a deposição em jato de cera que vai formando a superfície de cada camada.

Uma distinção lógica entre os diferentes processos reside no material de que é composto o modelo ou protótipo criado. Assim, o espectro dos materiais utilizados expande-se desde resina fotopolimérica, passando pelo papel, ceras, materiais poliméricos, materiais compósitos, até ao metal. Devido à evidente diversidade de soluções, neste relatório serão mencionados mais detalhadamente os processos que utilizam a resina e cera como materiais dos modelos, uma vez que são os materiais utilizados no trabalho experimental.

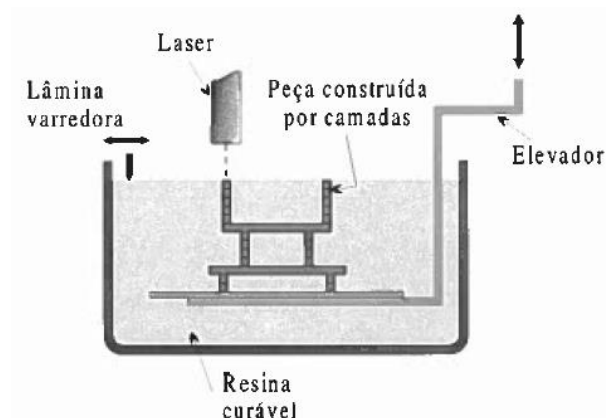
### Estereolitografia

A estereolitografia é o processo de fabricação aditiva mais antigo e é na atualidade amplamente difundido. O modelo resultante é construído por fotopolimerização de uma resina epoxídica líquida (características na tabela 2), utilizando um feixe laser de raios ultravioleta, que provoca na resina uma reação fotoquímica. Esta reação de polimerização da resina ocorre nas zonas onde o feixe incide. A extensão depende da potência do feixe laser, do seu diâmetro e da velocidade de varrimento (Alves 2001).

**Tabela 2 – Características típicas da resina líquida fotopolimerizável (Huntsman)**

Propriedades/Características	Resina líquida (SI7810)
Aparência	Líquido branco
Densidade a 25°C	1,13 g/cm <sup>3</sup>
Viscosidade	
a 28°C	0,24 N × s/m <sup>2</sup>
a 30°C	0,21 N × s/m <sup>2</sup>
Profundidade de penetração da luz	0,14 mm
Exposição crítica	9,9 mJ/cm <sup>2</sup>
Espessura de camada	0,10 mm

Na figura 15 é possível observar o esquema dos elementos e princípio de funcionamento de uma máquina de estereolitografia.



**Figura 15 – Elementos e princípio de funcionamento de um aparelho SLA (Alves 2001)**

No início da materialização de um modelo, a porta de acesso à área de trabalho é selada devido aos fumos decorrentes do processo de fabrico. O elevador é colocado, com auxílio de sistemas integrados eletromecânicos de grande precisão, numa posição imediatamente abaixo da superfície da resina líquida presente no reservatório. Como referido, este material tem a propriedade de solidificar quando incidido com luz ultravioleta. Assim, à medida que o laser trabalha num plano X-Y, guiado pela informação contida no ficheiro CAD entretanto interpretado e modificado por *software* dedicado da máquina, uma porção de uma determinada camada solidifica. Quando a camada está concluída, o elevador desce e começa a ser construída nova camada. A peça é construída desta forma, camada a camada.

Como o meio envolvente do modelo em fabricação é líquido, todas as zonas das peças sem apoio necessitam de suportes sólidos em resina, para que seja possível construir os modelos. Estes suportes são gerados automaticamente pelo *software* do equipamento, simultaneamente com a definição do número de camadas (Alves 2001).

Terminado o processo de fabrico, a peça é elevada do reservatório, pelo elevador, libertando-se da resina líquida que lhe está subjacente. É feita uma limpeza e realizada uma cura, também com luz ultravioleta, para endurecer a estrutura da peça (tab. 3). Finalmente são retirados os eventuais suportes que a peça possua (Grenda 2009).

**Tabela 3 – Características típicas da resina fotopolimerizável endurecida e após cura de 90 minutos (Huntsman)**

<b>Propriedades/Características</b>	<b>Resina endurecida (SI7810)</b>
Dureza	<b>86 Shore D</b>
Módulo de elasticidade	<b>2400 MPa</b>
Resistência à flexão	<b>69 MPa</b>
Resistência à tração	<b>51 MPa</b>
Alongamento após rotura	<b>0,14 mm</b>
Temperatura de distorção térmica	<b>51 °C</b>
Coefficiente de expansão térmica	<b><math>96 \times 10^{-6} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}</math></b>
Densidade após cura	<b>1,16 g/cm<sup>3</sup></b>

A utilização deste processo para a criação de modelos apresenta as seguintes vantagens (Alves 2001):

- Um dos melhores processos em termos de precisão dimensional ( $\pm 0,1\text{mm}$ );
- Permite obter as formas mais complexas e os detalhes mais finos;
- Possibilidade de obtenção de modelos parcialmente ocos, através da tecnologia “Quick Cast”, reduzindo assim os custos de produção;
- Ótimas superfícies de acabamento após lixamento e polimento.

Relativamente às limitações deste processo, podem enumerar-se as seguintes (Alves 2001):

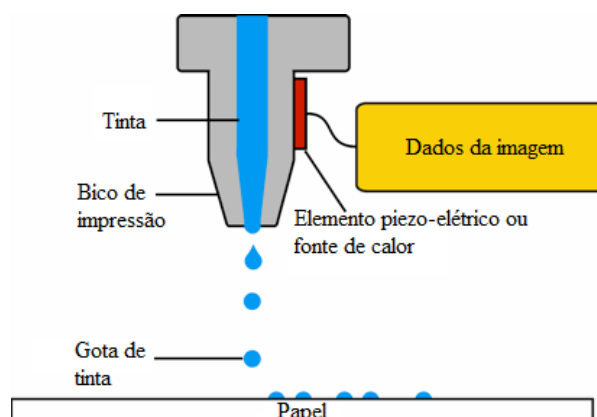
- Elevado custo das matérias-primas;
- Fraca resistência mecânica dos componentes;
- Necessidade de pós cura e propensão a empenos.

### **Impressão de cera**

O processo de criação de um protótipo, utilizando para o efeito uma impressora com capacidade de impressão de modelos tridimensionais em cera, é particularmente interessante para o processo de fundição de cera perdida. A justificação mais evidente para a utilização deste tipo de tecnologia é o facto de o modelo em cera ser impresso diretamente, sendo portanto dispensável do processo de fabrico, o procedimento de criação de um protótipo adicional noutro tipo de material e a criação de moldes de injeção de cera. É portanto uma solução aliciante para o processo de cera perdida, uma vez que é expedita e, em determinadas situações, é mais económica, tendo portanto especial relevo na realização deste trabalho.

As impressoras com capacidade de imprimir modelos em cera seguem o processo de impressão por jato de material, que utiliza cabeças de impressão semelhantes às presentes nas conhecidas impressoras de jato de tinta (fig. 16).





**Figura 16 - Funcionamento de uma impressora por jato ("Digital Print Preservation Portal").**

Uma ou mais cabeças de impressão presentes na impressora de cera depositam seletivamente gotas de material, na área de impressão. É comum estas cabeças de utilizarem vários bicos, para aumentar a velocidade e permitir a impressão de mais de um material. No que diz respeito aos materiais, uma das ceras utilizada é solúvel e serve de suporte estrutural, enquanto a segunda é usada como material base do modelo (Wohlers 2013). As características dos materiais de base e de suporte estão presentes na tabela 4.

**Tabela 4 - Propriedades típicas das ceras utilizadas na impressão tridimensional (VisiJet Materials for ProJet CP & CPX Printers)**

<b>Propriedades/Características</b>	<b>Material Base (VisiJet Prowax)</b>	<b>Material Suporte (VisiJet S400)</b>
Composição	100% Cera	n/a
Cor	Azul clara	Branca
Densidade a 80°C ( $g/cm^3$ )	0,81	0,87
Temperatura de fusão (°C)	70	55 – 65
Temperatura de amolecimento (°C)	52 – 62	n/a
Contração volumétrica a 40 °C (%)	2,24	n/a
Contração linear a 40 °C (%)	0,75	n/a

À semelhança do que acontece na estereolitografia, a peça é construída por camadas sobrepostas no plano X-Y, sendo neste caso a base móvel. A duração da impressão depende essencialmente da altura Z das peças a imprimir, e não da área total de impressão.

Concluída a impressão, as peças em cera são retiradas da base amovível, sendo posteriormente removidos os respetivos suportes das peças, numa limpeza apropriada.

A utilização deste processo para a criação de modelos tem as seguintes vantagens:

- Elevada precisão dimensional ( $\pm 0,05mm$ );
- Permite obter formas complexas com espessuras reduzidas;
- Excelente acabamento;
- Material resultante do modelo permite utilizá-lo no processo de cera perdida.

As limitações são as descritas a seguir:

- Elevado custo das ceras de base e de suporte;
- Fragilidade e fraca resistência mecânica;
- Temperatura de amolecimento baixo, pelo que está sujeito facilmente a deformações por calor.
- Apesar de ser um processo rápido, a impressão pode demorar mais de 24h, dependendo este valor da altura das peças.

Esta tecnologia, por si só, não permite fabricar protótipos funcionais nos materiais definitivos, pelo que há a necessidade de adotar técnicas de conversão (direta e indireta) para produtos metálicos, como descrito no correspondente capítulo deste relatório.

### 2.3.3 Fabricação subtrativa

Tradicionalmente, a criação de protótipos era feita manualmente, utilizando métodos subtrativos. O material utilizado era maleável, como o barro, de forma a permitir uma avaliação estética, bem como testes preliminares. Peças ou produtos sujeitos a avaliação aerodinâmica são ainda hoje criados desta forma (Raquet 2005).

Ao contrário da fabricação aditiva, em que o modelo é formado pela junção de elementos de volume, os processos de fabricação subtrativa, como torneamento, fresagem, perfuração, eletroerosão, entre outros, são processos de fabrico abrasivos, ou seja de remoção de material (Gebhardt 2003).

A fabricação subtrativa contemporânea é maioritariamente realizada por máquinas CNC.

De uma forma genérica, o processo de fabrico subtrativo atual começa com um modelo tridimensional em computador, sendo este avaliado para gerar um conjunto de instruções sequencial, que possibilita a materialização do modelo. Um bloco de material de que vai ser composto o modelo (que pode ser de diversos tipos, inclusive cera maquinável), é colocado e fixado na base da máquina e, assim que se inicia o processo, a máquina executa as instruções pré-programadas (Raquet 2005).

As características da maquinagem CNC tornam-na ideal para a realização de protótipos sólidos, normalmente sem a reprodução da geometria interior e com características exteriores iguais às do produto final. Estes protótipos podem ser produzidos em qualquer material e receber acabamentos, tais como pinturas, que lhes confirmam as propriedades e características exteriores do produto final (Alves 2001).

A principal limitação da utilização deste tipo de processo de fabrico prende-se com a execução de formas geométricas de elevada complexidade, as quais exigem ferramentas de

cutte de muito pequena dimensão e a obrigatoriedade de se efetuarem muitas passagens para a obtenção de acabamentos de alta qualidade, tornando o seu custo extremamente elevado (Alves 2001).

#### **2.3.4 Conversão direta vs. Conversão indireta de protótipos em peças metálicas**

A grande vantagem das metodologias de fabrico aditivo consiste exatamente na rapidez e na possibilidade de se obterem protótipos com características dimensionais, geométricas e de acabamento superficial, muito semelhantes às futuras peças finais. No entanto, na maior parte dos casos, estas tecnologias, por si só, não permitem fabricar protótipos funcionais nos materiais definitivos, pelo que há a necessidade de adotar técnicas de conversão para produtos metálicos. Apesar dos custos associados à produção de protótipos e pré-séries por estes processos de conversão serem elevados, os prazos de entrega são muito curtos, permitindo assim aumentar a competitividade das empresas (Neto, Lino, e da Rocha).

##### **Conversão direta**

Neste método, o protótipo é usado como modelo perdido, da mesma forma que é usada a cera no processo de cera perdida. O modelo pode ser obtido em SL oca (“Quick Cast”), SLS (poliestireno), FDM (ABS) ou Impressão de Cera (Alves 2001). Este último é sem dúvida o ideal, uma vez que o modelo obtido é já em cera, enquadrando-se perfeitamente no processo de fundição de cera perdida.

Os modelos convertidos em peças metálicas desta forma direta podem não apresentar planos de apartação e dispensar saídas. Para além dessa vantagem construtiva outra, e provavelmente a principal, é a rapidez com que se passa de uma peça modelada em CAD 3D para um protótipo funcional, no material metálico pretendido. A desvantagem é o excessivo preço de cada protótipo, aliado ao elevado risco da peça fundida de não sair bem à primeira, tornando o processo bastante oneroso caso tenham de se imprimir vários exemplares (Neto, Lino, e da Rocha).

##### **Conversão indireta**

No processo indireto os modelos não são perdidos, sendo por isso mais tolerante a erros de processamento. Tem no entanto a desvantagem de ser mais demorado (Alves 2001).

Neste caso os modelos obtidos por técnicas de fabricação aditiva como SL, SLS, FDM, ou outros, são usados para a obtenção de um molde para a injeção de cera. Por este motivo, é recomendável e por vezes necessário que o modelo apresente saídas e, naturalmente, os modelos obtidos em cera apresentarão planos de apartação, devidos à divisão das partes do molde.

Para a obtenção do molde de injeção de cera, há duas alternativas a considerar: ou se máquina as cavidades de um bloco de alumínio, dispensando assim a realização do protótipo, ou em oposição, recorre-se ao protótipo obtido por fabricação aditiva, como elemento de construção do molde. Neste último caso os moldes obtidos podem ser basicamente de dois tipos:

- Moldes flexíveis em silicone (fig. 17)



**Figura 17 – Molde de injeção de cera em silicone (Neto, Paiva, e Paiva 2001)**

São utilizados quando os modelos a reproduzir apresentam superfícies sem saídas, têm grandes espessuras com pouca saída, ou quando se prevê que as posteriores desmoldações se façam com dificuldade (Alves 2001). A injeção da cera, ainda que seja feita a pressões relativamente baixas (1 a 3 bar), provoca sempre distorção no molde, que se reflete nas modelos obtidos em cera (Neto, Lino, e da Rocha). Outra desvantagem é o tempo de arrefecimento elevado da cera presente no interior do molde.

- Moldes em resina carregada com partículas de alumínio (fig. 18)



**Figura 18 - Molde em resina carregada com partículas de alumínio**

A sua utilização é privilegiada nos casos em que os modelos apresentam boas saídas e quando se pretende rigor dimensional, uma vez que a injeção a baixas pressões não distorce o molde. Os moldes são obtidos por vazamento duma mistura de poliuretano com pós de alumínio. A presença dos pós de alumínio tem diversas funções, como a de aumentar a condutividade térmica do molde, o que se traduz numa diminuição do tempo de solidificação e arrefecimento da cera presente no seu interior. Aquando da solidificação do próprio molde, controla as contrações da resina, atuando portanto como carga na mistura. Finalmente, devido

ao seu preço inferior, quando comparado com a resina, diminui os custos de produção do molde.

## **2.4 Fabricação do macho**

Há diferentes tipos de machos, sendo a principal diferença entre estes o material constituinte.

Algumas peças apresentam cavidades internas mais ou menos complexas, nomeadamente furos e reentrâncias. Para cavidades menos complexas os machos são facilmente retirados do modelo. Por outro lado, quando as cavidades em causa apresentam formas complexas, pode acontecer de o macho não poder ser extraído. Assim sendo, uma forma de contornar o problema é utilizar machos em cera solúvel ou areia (Ferreira 1999).

A cera solúvel é particularmente indicada para a utilização de machos no processo de cera perdida, uma vez que o método de remoção deste macho em cera, não afeta o modelo em cera de precisão.

## **2.5 Ceras**

Como o nome do processo de fundição – Processo de Cera Perdida – já indicia, a cera é o material base mais utilizado, para a maioria dos modelos perdidos.

De facto, a cera, em conjugação com outros elementos que favorecem as suas características, é o material ideal pois subscreve todos os requisitos que um modelo perdido deve ter (Ferreira 1999):

- O material deve fundir a uma temperatura relativamente baixa, sem deixar resíduos na moldação;
- Esse material não deve atacar nem o material das moldações onde o modelo é feito, nem o das moldações a que vai dar origem;
- Embora se exija uma baixa temperatura de fusão, ao material do modelo perdido, é preciso que à temperatura a que for manipulado tenha resistência mecânica suficiente para não se deformar e uma dureza tal que não seja facilmente riscado. Isto porque todos os defeitos, quer de forma quer de superfície, se vão reproduzir na moldação cerâmica e posteriormente na peça vazada;
- O modelo perdido deve ser num material que encha rapidamente a moldação onde é injetado e que permita:
  - Obter modelos perdidos com muito pequena rugosidade;
  - Definir bem as arestas vivas e os contornos e reproduzir bem todos os pormenores;
  - Tanto quanto possível, ter um pequeno coeficiente de contração para não haver diferenças significativas entre a forma do modelo e da moldação.

Formulações contendo apenas ceras são raramente utilizadas, devido ao facto das suas propriedades melhorarem drasticamente, através da adição de materiais como resinas, plásticos, agentes de enchimento, plastificantes, antioxidantes e corantes (ASMHandbookCommittee 1998). Com a combinação e variação das proporções destes materiais, as propriedades tais como o ponto de fusão, a viscosidade, a expansão/contração, a

dureza, entre outras, podem ser manipuladas para corresponder a requisitos específicos (Ferreira 1999).

Os tipos de ceras mais utilizadas como modelos, são as parafinas e as microcristalinas. Estas são frequentemente combinadas, uma vez que as suas propriedades tendem a complementar-se (ASMHandbookCommitee 1998).

As ceras de parafina têm pontos de fusão definidos de forma precisa em intervalos de 2,8°C, que variam entre 52°C e 68°C. Definir com esta exatidão, o ponto de fusão que se pretende na cera, é uma das vantagens, que, em conjunto com o seu baixo custo e fácil obtenção, tornam-na numa cera extremamente difundida. Como limitações, esta cera apresenta fragilidade e elevada contração, que podem ser minimizadas com a inclusão de aditivos na sua formulação (Ferreira 1999).

As ceras microcristalinas apresentam um maior peso molecular que as ceras de parafina. Ao contrário destas últimas, as microcristalinas são opacas e possuem uma estrutura cristalina fina (Ferreira 1999). Têm um ponto de fusão superior e são, como referido anteriormente, utilizadas em combinação com as parafinas.

Para modelos de cera que se pretende que sejam opacos, utiliza-se, para dar forma a esse volume interior, uma cera específica denominada cera solúvel.

Este tipo de cera possui temperaturas de fusão entre 85°C e 90°C e, na sua maioria, é composta por três materiais base (Wolff):

- 1) Ligante
- 2) Cargas
- 3) Agente efervescente

O ligante é normalmente polietileno glicol, estando disponível em diversos pesos moleculares e é usado em diferentes combinações para obter a desejada viscosidade, dureza e temperatura de fusão. As cargas, presentes sob a forma de pós, têm como finalidade reduzir a contração existente aquando da solidificação. O bicarbonato de sódio é o agente efervescente adicionado à cera, que estimula o processo de lixiviação, tendo também como finalidade ser um agente de enchimento (Wolff).

## **Aditivos**

Embora as ceras sejam o elemento preponderante na formulação do material para um modelo perdido, estas apresentam limitações técnicas, a nível da resistência e rigidez, bem como no controlo dimensional, provocado por elevadas contrações ocorridas durante a solidificação (após injeção).

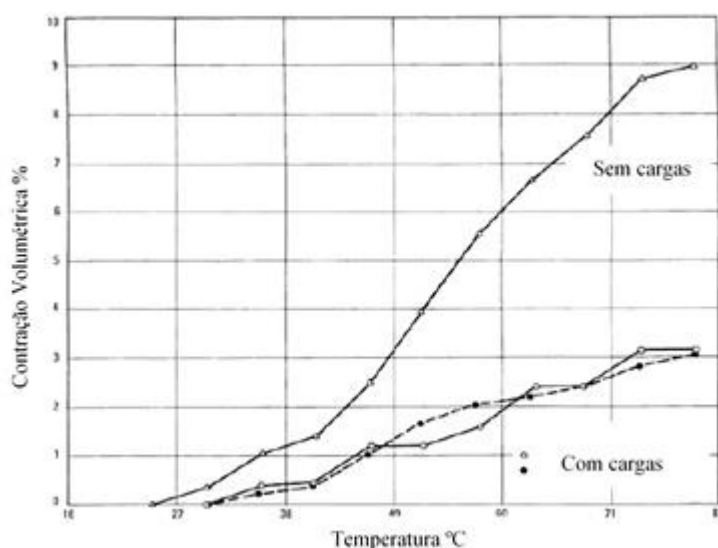
Para minorar estes efeitos, é comum a adição de materiais que colmatem estas deficiências. Assim, no que diz respeito à resistência e tenacidade, estas propriedades são melhoradas com a presença de polímeros de alta densidade molecular na formulação, nomeadamente polietileno, acetato de vinil-etileno, acrilato de vinil-acetato, nylon ou celulose etífica. A quantidade destes polímeros está limitada, no sentido em que apresentam uma elevada viscosidade às temperaturas a que as ceras são utilizadas. No entanto, pequenas quantidades são suficientes para se notarem melhorias significativas das propriedades (Ferreira 1999).

As distorções geométricas e rechupes, provocados pela contração durante o processo de solidificação das ceras, podem ser minoradas com a adição de resinas ou pós inertes. O uso

das resinas é relativamente generalizado, ao passo que as cargas ou pós inertes são utilizados de forma mais seletiva (ASMHandbookCommitee 1998).

Relativamente às resinas, existe uma grande variedade disponível, de entre as quais se distinguem as resinas sintéticas e as derivadas de fontes naturais, tais como a resina de pinheiro, óleo de crude e alcatrão do carvão. A escolha da resina é feita em função da compatibilidade com as ceras e polímeros presentes na formulação, do seu ponto de amolecimento e da viscosidade versus relação com a temperatura (Ferreira 1999).

No que diz respeito às cargas, ou pós inertes, estas são adicionadas à formulação, e mantêm-se sempre no estado sólido, não sofrendo portanto variações volumétricas. Nesse sentido, quanto maior a percentagem de pós inertes adicionados, menor a contração da cera. A influência da presença de cargas na cera pode ser observada no gráfico presente na figura 19, onde se verifica que aquando do aumento/diminuição da temperatura, o declive é bastante superior no caso em que não há cargas na formulação. Exemplos de cargas utilizadas são o poliestireno, bisfenol e ácido isofilático.



**Figura 19 - Efeito das cargas na contração volumétrica da cera (ASMHandbookCommitee 1998)**

Tendo em conta as considerações até aqui tecidas sobre as ceras e seus aditivos, a constituição e respetivas quantidades de materiais dos modelos de cera podem ser resumidas na tabela 5:

**Tabela 5 - Composições típicas dos modelos em cera (ASMHandbookCommitee 1998)**

<b>Materiais constituintes</b>	<b>Composição (%)</b>
Ceras (normalmente mais que uma)	30-70
Resinas (uma ou duas)	20-60
Plástico	0-20
Outros	0-5

## Seleção das Ceras

A seleção de uma cera para modelo perdido, é determinada por aplicações particulares, no entanto os fatores que devem ser considerados em cada um dos estágios do processo são descritos na tabela 6:

**Tabela 6 - Critérios de seleção das ceras (Ferreira 1999)**

Injeção	Ponto de amolecimento, gama de arrefecimento, propriedades reológicas, capacidade para duplicação de detalhes, superfície e tempo de produção total
Remoção, Manuseamento e Montagem	Poder lubrificante, resistência, rigidez, dureza, resistência ao impacto, estabilidade e soldabilidade
Controlo Dimensional	Expansão/contração térmica e por solidificação, tendência à cavitação, distorção e estabilidade
Construção da moldação	Resistência, tenacidade, resistência aos aglomerantes e aos solventes
Remoção do modelo de cera da moldação	Ponto de amolecimento, viscosidade, expansão térmica, difusão térmica e conteúdo em cinzas
Diversos	Custo, disponibilidade, facilidade de reciclagem, toxicidade e fatores ambientais

## Injeção de ceras

As ceras destinadas ao processo de fabrico de modelos são injetadas, a relativamente baixas temperaturas e pressões, num molde de produção de modelos de cera (em silicone, resina com pós de alumínio ou alumínio), utilizando para o efeito equipamento específico (fig.20).



**Figura 20- Máquina de injeção de cera pronta a injetar cera num molde [INEGI]**



As ceras podem ser injetadas no estado líquido, pastoso ou sólido. Neste último caso, o processo é por vezes denominado por extrusão de cera.

Quanto às condições de injeção, as temperaturas variam entre os 43°C até aos 77°C e as pressões entre 275kPa até 10MPa (ASMHandbookCommitee 1998).

O tipo de equipamento utilizado varia e pode ser desde simples e relativamente barato a complexo e dispendioso. Relativamente ao equipamento mais simples, e por isso mais frequentemente utilizado, este consiste num reservatório de cera no estado líquido com um cilindro de injeção, um bocal e conjunto de válvulas temporizadas. A cera líquida flui do reservatório para o cilindro de injeção, onde é pressurizada e forçada a sair pelo injetor para o interior da moldação. Os parâmetros principais e controláveis, que têm influência direta na qualidade do modelo em cera, são a temperatura e pressão (Ferreira 1999).

### **Defeitos dos modelos em cera**

Os defeitos nos modelos em cera dependem, ou são influenciados significativamente, por determinadas características, tanto da injeção como do tipo de molde.

A temperatura de injeção deve ser a fornecida pelo fabricante, uma vez que, por vezes, uma diferença de 2°C é o suficiente para que ocorram defeitos no modelo perdido.

Nesse sentido, injetar cera a uma temperatura superior à recomendada pode causar os seguintes defeitos (Wolff):

- Alterações dimensionais do modelo resultante;
- Rechupes;
- Excesso de rebarba no modelo em cera;
- Aumentar o tempo de permanência do modelo no molde;
- Bolhas de ar aprisionadas devido a turbulência no molde.

Por outro lado, injetar a uma temperatura inferior pode acarretar defeitos, tais como (Wolff):

- Não enchimento;
- Ondulações e linhas na superfície do modelo;
- Mudanças dimensionais;
- Defeitos superficiais.

Quando as temperaturas de injeção são respeitadas e ocorre algum destes últimos defeitos, o problema pode estar na própria injeção da cera. Neste sentido, se a injeção for realizada com um caudal demasiado lento, a cera, ao percorrer o canal de injeção e cavidade do molde, pode arrefecer e assim aumentar a viscosidade. Quando isto acontece, deve-se ajustar o parâmetro da pressão, de forma a ter uma injeção mais expedita. Caso não seja possível, deve considerar-se, se possível, ajustar a própria temperatura do molde, por forma a obter uma injeção adequada, tendo em consideração que uma temperatura elevada deste provoca um aumento da permanência do modelo em cera (Wolff).

Um defeito, muitas vezes não visível, são tensões residuais presentes no modelo, resultantes de um arrefecimento desigual. As soluções possíveis neste caso, isoladamente ou em

conjunto, passam por injetar a uma temperatura inferior, permitir que o modelo se mantenha mais tempo no molde ou mesmo recorrer a um elemento de arrefecimento externo.

## 2.6 Processo de Cera Perdida

### 2.6.1 Introdução

O processo de cera perdida, ou *Investment Casting*, é um processo de fundição normalmente associado à produção de peças com geometria complexa. Por esse motivo é por vezes denominado por fundição de precisão (Ferreira 1999). O termo cera perdida, nome pelo qual o processo é conhecido, é atribuído pelo facto do modelo em cera, que dá a forma geométrica da cavidade moldante, ser desfeito e perdido por fusão.

A fundição de metais líquidos para produzir objetos sólidos é um processo de fabrico que data de mais de 5000 anos, sendo o processo de cera perdida um dos primeiros utilizados para o efeito (Jones e Yuan 2003). A ideia inicial consistiu em esculpir um modelo em cera de abelha (material que era utilizado frequentemente na altura, sobretudo para a criação de figuras de adoração) cobrindo-o com barro, para que este reproduzisse a forma do modelo. Através do aquecimento, o barro endurecia e, simultaneamente, a cera derretia, saindo assim da moldação. Na cavidade criada na moldação em barro era então vazado o metal, obtendo-se a peça pretendida após a destruição da moldação de barro (Hunt 1980).



**Figura 21 – Peça em cobre de 2850 A.C. produzida pelo processo de cera perdida (Hunt 1980).**

Ao longo dos tempos, em diferentes eras e civilizações, o processo foi utilizado sobretudo na produção de estatuária e joalharia, sendo também aplicado na produção de armamento, ferramentas e utensílios (Ferreira 1999).

Apesar de nunca ter sido esquecido, o processo foi, de certa forma, redescoberto no final do século XIX quando o Dr. B.F. Philbrook o decidiu utilizar para produzir coroas e implantes dentários (ASMHandbookCommittee 1998). Industrialmente, este sofisticado processo, começou a ter especial relevância pouco tempo depois, aquando da Primeira Guerra Mundial,

decorrentes das urgentes necessidades militares. O facto de possibilitar criar peças complexas com elevada precisão, algumas delas que não eram sequer possíveis de realizar de qualquer forma, dispensando processos dispendiosos e que consumiam muito tempo, como maquinagem, soldagem e montagem, generalizaram o uso deste processo de fundição (ASMHandbookCommitee 1998). Com essa expansão, decorrente das necessidades supracitadas, o próprio processo foi sendo melhorado, nomeadamente nas composições das formulações das camadas, bem como especificações de tempos de processo, até aos dias de hoje.

Atualmente, este processo de fundição é utilizado em diversas áreas como nas indústrias aeronáutica e aeroespacial, em aplicações militares (mísseis), indústria automóvel, equipamentos eletrónicos, medicina dentária e de reabilitação, joalheria, máquinas-ferramentas, sistemas hidráulicos e pneumáticos, máquinas para a indústria têxtil, entre outras (ASMHandbookCommitee 1998).



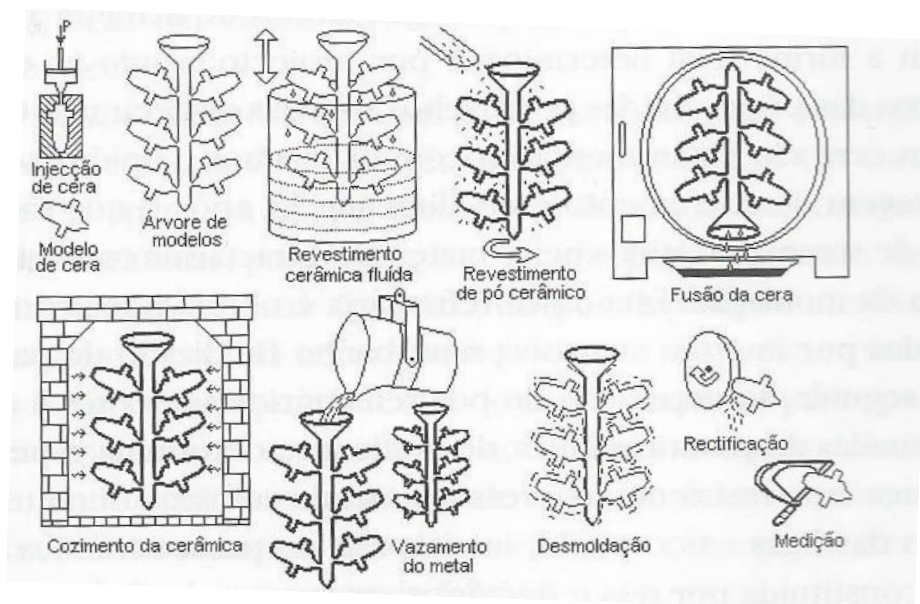
**Figura 22 - Turbina fabricada pelo processo de cera perdida (FoundrySuppliers)**

Este tem enormes vantagens na produção de peças de qualidade beneficiando da precisão, versatilidade e integridade do próprio processo. Na ótica de produção diversificada de diferentes tipos de materiais, com geometrias complexas, este torna-se o processo mais económico. Para produções dedicadas e em série, cujas peças a fundir estejam dentro de geometrias exequíveis, com materiais constantes, é eventualmente preferível optar por outro tipo de processo de fundição. (Jones e Yuan 2003)

O processo pode também ser utilizado para obter protótipos ou mesmo pré-series de determinadas peças ou modelos funcionais ou semi-funcionais, na liga metálica pretendida. Como foi mencionado no capítulo de geração de modelo físico, do presente relatório, a rapidez de obtenção de produtos funcionais é importante por diversos motivos. Aliado a isso, o facto de não implicar o investimento e obtenção imediata de máquinas dedicadas, ferramentas ou moldes metálicos permanentes, torna este processo uma opção extremamente válida, nomeadamente no âmbito deste trabalho, para a realização de protótipos de torneiras.

### 2.6.2 Etapas do Processo

Este processo de fundição é composto por um certo número de etapas, que permanecem fieis à filosofia do processo original, naturalmente evoluídos sob o ponto de vista tecnológico, nomeadamente em termos de materiais e tempos de execução. A figura 23 permite perceber as diferentes etapas que constituem o processo de cera perdida.



**Figura 23 - Diferentes etapas do processo de cera perdida (Ferreira 1999)**

O processo de fundição de cera perdida inicia-se desde logo com a criação e preparação de um modelo em cera. A obtenção desse modelo, como já referido, pode ser conseguida de duas formas – por conversão direta ou indireta. Escolhido o método que se achar mais conveniente, o modelo em cera pode ser integrado numa árvore de modelos, sendo que esta define os canais de gitagem e tem como principal propósito tornar o processo mais económico, no sentido em que são agrupados vários exemplares num só ciclo de produção. O número de modelos está não só dependente de detalhes do próprio processo, como do metal a ser utilizado, das condições de vazamento, entre outras, mas também de fatores que limitam a produção, neste caso as dimensões das cubas de imersão e fornos disponíveis. Nesta fase, caso seja necessário, são também colocados alimentadores que previnem a criação de rechupes, por contração do metal, garantindo assim o enchimento completo dos modelos presentes na árvore.

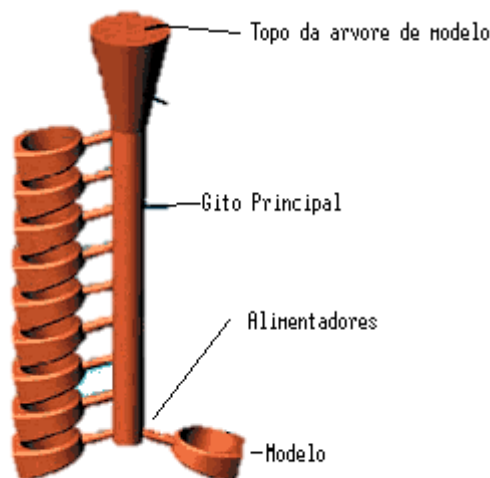
A fase seguinte consiste no mergulho do modelo ou árvore num agente desengordurante, que permitirá uma aderência completa da primeira camada de barbotina à superfície da cera. Após limpeza e secagem, o modelo está preparado para a fase de criação de camadas cerâmicas, que vão constituir a carapaça moldante. Estas camadas são formadas através da imersão do modelo em barbotina, seguido de polvilhamento com partículas cerâmicas que, nas primeiras camadas, são compostas por pós muito finos para garantirem um bom acabamento superficial. À medida que vão sendo construídas as camadas exteriores, a granulometria escolhida para a composição vai sendo maior, de modo a aumentar a resistência mecânica do corpo da casca cerâmica. Normalmente as carapaças têm entre 7 a 10 camadas, sendo que a espessura ideal seja tal que torne a carapaça auto resistente às pressões metalo-estáticas presentes durante o vazamento da liga (Ferreira 1999).

Concluída a construção da carapaça, segue-se a descerificação que consiste na fusão e remoção da cera, de forma a revelar a cavidade moldante. Esta fase pode ser feita em autoclave (vapor de água sob pressão) ou por choque térmico. Neste último processo, apesar de não ser recomendável sob o ponto de vista ambiental pela libertação de fumos tóxicos, pode ser combinado com a fase seguinte do processo – a sinterização da carapaça. A sinterização tem como propósito reforçar estruturalmente a carapaça e remover eventuais resíduos de cera e materiais orgânicos ainda presentes.

Após este passo, a carapaça está preparada para receber o vazamento do metal na sua cavidade moldante. Imediatamente antes disso, a carapaça é colocada num forno a uma temperatura dita de pré-aquecimento. Este passo é importante na medida em que aumenta a vazabilidade do processo, permitindo um correto enchimento e arrefecimentos relativamente uniformes, o que se vai refletir na qualidade da peça metálica obtida.

### 2.6.3 Sistema de gitagem

O sistema de gitagem de uma peça de fundição é constituído por um conjunto de canais e elementos externos à peça fundida. Este tem como propósito permitir o vazamento de metal para as cavidade da moldação (sistema de gitagem de enchimento) e, após o enchimento da cavidade, compensar a contração do metal na peça (sistema de alimentação).



**Figura 24 - Exemplificação de um sistema de gitagem utilizado no processo de fundição de cera perdida (Bell)**

No processo de projeção do sistema de gitagem deve-se estabelecer o número, forma, dimensões e localização dos gitos. De tal forma que no conjunto da série de peças a produzir se atinja a maior economia. Esta otimização dos custos deve fazer-se em dois pontos:

- No aproveitamento do material;
- No aproveitamento do trabalho de moldação.

O projeto dos sistemas de gitagem engloba o estudo de todas as medidas convergentes para a obtenção de peças sãs. Assim, por exemplo, depois de escolhida a liga metálica e o *design* da

peça a obter, contando com possíveis alterações de espessuras, devem ser estudados as matérias da moldação e o traçado dos alimentadores e canais de enchimento, com vista à obtenção de peças sãs. Os fatores a ter em conta no desenho do sistema de gitagem são (Ferreira 1999):

- Enchimento rápido da moldação;
- Minimizar a turbulência;
- Evitar erosão do molde e dos machos;
- Remover a escória, impurezas e inclusões;
- Promover gradientes de temperatura favoráveis;
- Melhorar os custos da produção;
- Evitar distorção na cavidade de moldação;
- Controlar condições de escoamento

#### 2.6.4 Criação da carapaça cerâmica

A carapaça cerâmica que reveste o modelo ou árvore de modelos é composta por um conjunto de camadas, em que cada uma delas consiste na imersão do modelo em banho de pós refratários com um agente ligante, denominados por barbotinas, sendo, após escoado o excedente de fluído refratário presente no modelo, seguido duma imersão numa cama fluidizada de partículas cerâmicas, ou então por projeção dessas partículas (Ferreira 1999). As camadas são construídas sucessivamente e existindo entre elas um tempo de secagem que depende tanto da composição da barbotina, como da geometria da peça. A primeira camada cerâmica é constituída por finas partículas que, estando em contacto com o modelo em cera, reproduzem todos os detalhes, incluindo a rugosidade superficial (ASM Handbook Committee 1998). A granulometria dos elementos presentes em cada camada vai aumentando com a aplicação das camadas anteriores. Isto confere à carapaça uma maior integridade estrutural e previne a fissuração, proporcionando ligação entre as camadas.

A última camada é normalmente apenas um banho de barbotina, que vai confirmar a aderência final das partículas da camada anterior.

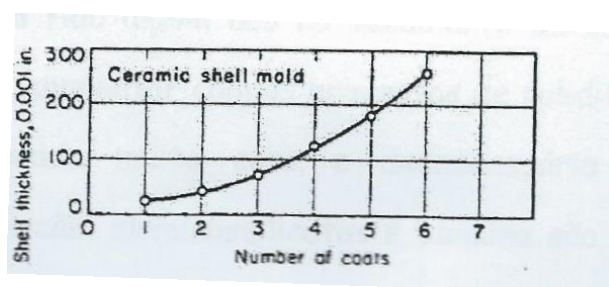


Figura 25 - Evolução da espessura em função do nº de camadas (Ribeiro 1999)

A espessura da carapaça pode variar entre valores de 6 a 12 mm, dependendo não só da forma e peso do modelo ou árvore de modelos, mas também dos tipos de barbotinas e cerâmicos utilizados na construção. A espessura deverá ter a espessura mínima possível de forma a resistir às condições adversas que o pré-aquecimento e sobretudo o vazamento. Uma espessura menor também reflete uma maior permeabilidade da carapaça.

### Materiais refratários

Os materiais refratários mais comuns utilizados na construção de moldações em carapaça cerâmica são pós de sílica, ou de zircónia, e vários silicatos de alumina compostos por mulite ou sílica livre. Estes componentes são usados para a maioria das aplicações, sendo combinados de formas diferentes.

A sílica é utilizada sob a forma vítrea, sendo obtida por fusão de areias de quartzo que é posteriormente triturado e utilizado, tanto para a formação de estuques, como em pós finos, integrados nos banhos fluidizados. O baixo coeficiente de expansão térmica da sílica torna-a um elemento preponderante na construção das carapaças, pois fornece a resistência aos choques térmicos.

A zircónia, utilizada principalmente como revestimento primário nos banhos fluidizados, é muitas vezes utilizada em conjunto com a sílica vítrea e/ou silicatos de alumina. A elevada refratariedade e a resistência ao molhamento pelos metais fundidos justificam a sua utilização.

Os silicatos de alumina são compostos por alumina, sendo a restante parte sílica e impurezas. Este material é calcinado e triturado podendo ser utilizado em banhos fluidizados ou como material granular para estuques. A alumina é mais refratária do que a sílica. Uma vez que é menos reativa com a maior parte das ligas metálicas, o seu uso é empregue sobretudo no vazamento das denominadas superligas (Ferreira 1999).

Na tabela 7 podem ser observadas as características dos materiais refratários mais utilizados - neste processo de fundição.

**Tabela 7 - Características de alguns materiais refratários (Ferreira 1999)**

<b>Material</b>	<b>Composição Química</b>	<b>Ponto de Fusão °C</b>	<b>Densidade Específica</b>	<b>Coeficiente de expansão Térmica /°C</b>
Alumina	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2050	3.90	9.5x10 <sup>-6</sup>
Oxido de Cálcio	CaO	2600	-	-
Cromite	CrO	1400	4.00	7.0x10 <sup>-6</sup>
Chamote		Indeterminado	2.0 a 2.5	6.0x10 <sup>-6</sup>
Magnesite	MgO	2800	-	-
Magnesite Spinel	MgO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2135	-	-
Molochite	-	1600	2.70	4.4x10 <sup>-6</sup>
Mulite	3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .2SiO <sub>2</sub>	1810	3.14	6.0x10 <sup>-6</sup>
Sílica Fundida	SiO <sub>2</sub>	1710	2.21	0.5x10 <sup>-6</sup>
Zircónia	ZrO <sub>2</sub> .SiO <sub>2</sub>	2420	4.2 a 4.6	4.5x10 <sup>-6</sup>
Zircómia Cálcia	CaO.ZrO <sub>2</sub>	2345	-	-



### Ligantes

Os ligantes, também designados aglomerantes, que têm uma utilização mais comum na composição das barbotinas são a sílica coloidal, o silicato de etilo hidrolisado e o silicato de sódio. Dos referidos, a sílica coloidal é o mais utilizado, consistindo numa dispersão coloidal (dispersão muito fina de partículas de uma substância no seio de um líquido) de partículas esféricas de sílica, em água. Sendo um excelente aglomerante de usos gerais, a sua principal desvantagem é o facto da sua base ser em água, o que origina tempos de secagem relativamente longos (Ferreira 1999).

Já o silicato de etilo, por si só, não apresenta propriedades ligantes até lhe ser acrescentado água que provoca a reação de hidrólise. A base utilizada neste ligante é álcool etílico, tendo como consequência tempos de secagem muito mais rápidos quando comparados com a sílica coloidal. Tem como limitações um elevado custo, para além de possuir riscos ambientais decorrentes da sua composição (Ferreira 1999).

### Outros ingredientes

As barbotinas têm ainda outros tipos de elementos na sua composição – agentes molhantes e antiespumantes.

Os agentes molhantes diminuem a tensão superficial, facilitando a dispersão e distribuição uniforme da barbotina na peça. O sulfonato de sódio ou sulfato de sódio são exemplo de molhantes utilizados.

Os agentes antiespumantes são utilizados para evitar a formação de espuma e, caso ainda assim estas ocorram, promover a libertação das mesmas, principalmente nas primeiras camadas. Os mais utilizados são emulsões aquosas de sílica e álcoois gordurosos.

A composição da barbotina é escolhida consoante a reatividade e ponto de fusão da liga metálica, que vai ser vazada na cavidade moldante (Ribeiro 1999).

### **2.6.5 Descerificação**

Quando a carapaça cerâmica tem uma espessura considerável que lhe forneça resistência mecânica (estrutural e térmica), o próximo passo no processo é remover o modelo em cera, ainda presente no seu interior.

Uma vez que a cera dilata consideravelmente aquando do aquecimento, esta fase gera tensões que podem inclusivamente colocar em risco a integridade da carapaça.

Há dois métodos de remoção de cera (Ferreira 1999):

- Choque térmico – a carapaça é colocada num forno, sendo posicionada para que a cera flua pela pia de vazamento, a uma temperatura elevada (cerca de 1000°C). A esta temperatura a cera em contato com a superfície interior da carapaça funde quase instantaneamente. Numa posição mais próxima do núcleo, a cera pode assim expandir, sem pressionar e danificar a carapaça. É comum serem feitos pequenos furos (em zonas de gitagem) e incluídos vents para que a cera fundida possa ter mais sítios por onde se libertar. Como inconveniente, devido às elevadas temperaturas, este método não permite a reutilização da cera, para modelos de precisão. Utilizando este método



nesta fase, há propensão em integrar a fase seguinte do processo – a sinterização da carapaça – o que acaba por ser conveniente e produtivo, por agrupar dois passos processuais, em apenas um.

- Autoclave – o outro método de extração do modelo em cera consiste na colocação da carapaça num autoclave. O autoclave gera vapor sobreaquecido a pressões na ordem dos 6 bar, o que permite retirar a cera, por fusão, do interior da moldação em cera de 15 minutos. Neste caso, para além de ser um processo mais limpo e respeitoso ambientalmente, a cera utilizada é reutilizável.

### 2.6.6 Sinterização

A fase do processo denominada sinterização da carapaça serve essencialmente dois propósitos (Ferreira 1999):

- a remoção de humidades e eventuais resíduos (orgânicos e de cera) que possam ainda estar presentes, decorrentes da fase de construção da carapaça;
- o reforço estrutural da carapaça. Este reforço é conseguido através das altas temperaturas requeridas pelo processo de sinterização, que permitem a formação de uma rede de sílica, que liga os pós refratários entre si.

Após sensivelmente duas horas, no final da operação de sinterização, a carapaça cerâmica deverá apresentar uma certa permeabilidade que permita a saída do ar, aquando do vazamento da liga na cavidade.

O pré-aquecimento é uma fase integrante e necessária do processo de fundição, pois melhora substancialmente a vazabilidade.

**Tabela 8 - Temperaturas de pré-aquecimento das carapaças consoante a liga (ASM Handbook Committee 1998)**

Liga	Temperatura de pré-aquecimento (°C)
Alumínio	150 – 540
Cobre	425 – 650
Aços e superligas	870 – 1095

### 2.6.7 Fundição

#### 2.6.7.1 Ligas de Latão

O corpo de uma torneira é composto, normalmente, por uma liga de latão. Embora existam materiais alternativos, como ligas de zinco, aço ou materiais poliméricos, o latão é o mais utilizado (How Products Are Made: Faucet).

A escolha do latão é justificada, não só pelas suas propriedades, que lhe conferem determinadas vantagens em certos processos de fabrico (temperatura de fusão relativamente baixa, boa maquinabilidade e diversidade de acabamentos possíveis), mas também por

apresentar boa resistência à corrosão em diversos meios, particularmente em água (Castro e Junqueira 1996). O fenómeno de calcificação devido à, eventual, elevada mineralização da água, também é minorado pela utilização de latão (How Products Are Made: Faucet).

Outra possível vantagem da utilização de latão é o facto do cobre, presente na liga, torná-la germicida. Dependendo do tipo e concentração de patogênicos e o meio em que estão inseridos, o latão elimina esses micro-organismos no intervalo de tempo compreendido entre alguns minutos a horas. O grau de eficácia desta importante característica está dependente do polimento e acabamento efetuados, sendo que a existência destes dois últimos parâmetros diminuem a sua eficiência ("TPJ - The Tube & Pipe Journal" 2011).

Os latões, que são ligas de cobre e zinco, podem ser produzidos a partir de matérias-primas obtidas por extração direta dos minérios dos metais seus constituintes (latões de produção primária) ou a partir de sucatas e resíduos (latões de produção secundária) por processos de reciclagem. Devido ao custo dos primeiros, a maioria de produção provem de processos de reciclagem (Castro e Junqueira 1996).

Relativamente à sua constituição, como já referido no parágrafo anterior, o latão é uma liga metálica composta por cobre e zinco, sendo as percentagens de cada um destes elementos de 50 a 95 % e de 50 a 5%, respetivamente. Quando o teor em zinco é superior a 30 %, a liga denomina-se “alto latão” ou “latão amarelo”, por outro lado, se a liga tem um teor em zinco menor que 20 %, então apelida-se como “baixo latão”. Quando a liga de latão possui uma composição aproximada a 60 % de cobre e a 40 % de zinco, a liga é tradicionalmente apelidada como metal muntz.(Castro 2008).

De acordo com o diagrama de fases do sistema Cu-Zn (fig. 26), é possível distinguir dois tipos de latões relevantes: Monofásicos (alfa) e Bifásicos (alfa + beta).

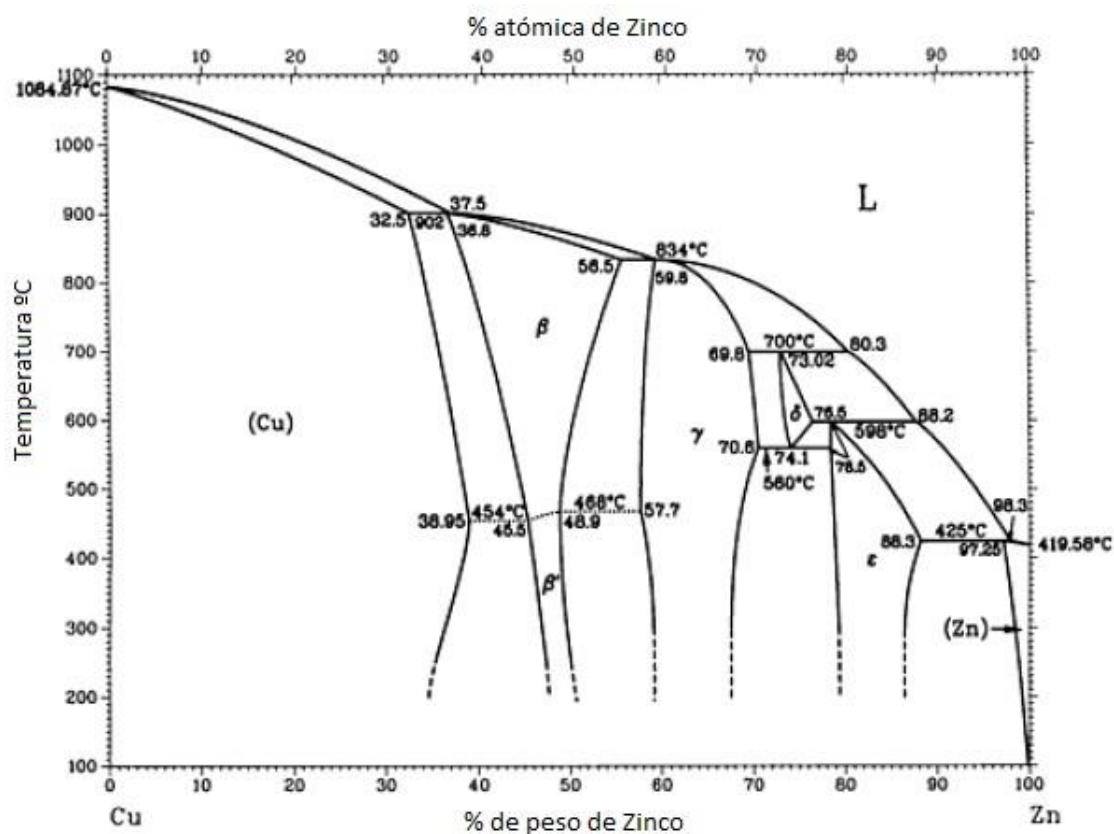


Figura 26 - Diagrama de fases Cu-Zn (ASM Handbook Committee 1998)

Os latões monofásicos (até 35% de zinco) caracterizam-se por conter apenas uma fase, a fase alfa, e apresentam a mesma estrutura cristalina do cobre - cubica de faces centradas (cfc). Por este motivo, são latões pouco duros, dúcteis e apropriados para o trabalho mecânico a frio (Castro e Junqueira 1996).

Os latões bifásicos (35% até 42% de zinco) apresentam uma microestrutura caracterizada por duas fases: a fase alfa e a fase beta. A fase beta dos latões é um composto de cobre e zinco, com estrutura cristalográfica cúbica de corpo centrado (ccc). (Castro e Junqueira 1996) Esta fase, comparativamente à fase  $\alpha$ , é mais dura e tem maior resistência mecânica, pelo que apresenta uma fraca deformabilidade a frio. Assim sendo, os latões bifásicos são aconselhados à estampagem, laminagem ou à extrusão a quente, onde apresentam características muito interessantes (Castro 2008).

### **Influência da composição química sobre as propriedades dos latões**

Os elementos que mais preponderância têm sobre as propriedades dos latões são os elementos maioritários – o cobre e o zinco. Há no entanto outros elementos que, em percentagens diminutas, podem melhorar substancialmente determinadas características.

Desta forma, a inclusão de certos elementos, bem como a sua influência pode ser resumida da seguinte forma (Castro e Junqueira 1996):

- **Alumínio** – Quando adicionado aos latões, tem como objetivos desoxidá-los durante a fundição, melhorar a sua fluidez e reduzir as perdas de zinco por evaporação.
- **Ferro** – O ferro melhora resistência à tração e ductilidade da liga de latão, por efeito de afinação de grão. A vazabilidade dos latões de fundição também é beneficiada com a integração deste elemento. Como desvantagem, quando empregue em grandes quantidades e/ou na presença de outros elementos, existe o perigo de formação de “pontos duros”, particularmente indesejáveis para operações de polimento e maquinagem.
- **Chumbo** – O chumbo é um elemento que melhora substancialmente a maquinabilidade dos latões. Este é praticamente insolúvel nos latões (apenas 0,04% a 800°C) e distribui-se na microestrutura sob a forma de glóbulos. Aquando das operações de maquinagem, o chumbo funde e serve de lubrificante, facilitando a quebra da apara, reduzindo as tensões de corte e baixando a taxa de desgaste das ferramentas de corte. Teores elevados em chumbo são no entanto inconvenientes, na medida em que baixam, especialmente a altas temperaturas, a resistência à tração dos latões, o que pode originar, o fenómeno de fissuração a quente, durante operações de estampagem, soldadura ou durante a solidificação de peças fundidas.

Este elemento era, até há relativamente pouco tempo, empregue na generalidade das ligas de latão que compunham as torneiras. No entanto, devido ao comprovado efeito nocivo do chumbo na saúde humana, nomeadamente por ingestão, a utilização deste está limitada através da Lei AB-1953 do Estado da Califórnia a uma percentagem residual de até 0,25%. (Assembly Bill 1953 2006) Pela interpretação e explicação da referida Lei, esta limitação de uso de chumbo, impede a sua utilização em torneiras de cozinha, lavatórios e outras. Não impossibilita, no entanto, a sua utilização, por

exemplo, em torneiras de chuveiros (Lead Free Legislation: The Affect on the Plumbing Industry).

- **Estanho** – Este elemento é responsável pela melhoria da resistência à corrosão dos latões, particularmente da resistência à dezincificação. Em geral, melhora ligeiramente as propriedades mecânicas dos latões, sendo no entanto a sua quantidade limitada a 0,8%.
- **Manganês** – A utilização deste elemento melhora significativamente a resistência mecânica dos latões e promove uma desoxidação eficaz durante a fusão. Valores percentuais acima de 1%, fazem com que o latão fique com dureza elevada, o que pode dificultar as operações de maquinagem.
- **Níquel** – O níquel melhora ligeiramente a resistência à corrosão das ligas de latão, mas, devido ao seu elevado custo, raramente é utilizado para essa função. Com valores percentuais entre 3 a 4%, a sua utilização promove significativamente a resistência mecânica. Quando combinado com o alumínio, o níquel provoca o endurecimento do latão por precipitação de aluminetos de níquel, podendo apresentar propriedades interessantes. Como desvantagem, este elemento reduz a maquinabilidade da liga.
- **Silício** – O silício promove a estabilização da fase beta, tornando-os assim mais duros e resistentes e melhora também a vazabilidade dos latões. A sua utilização diminui a maquinabilidade e polimento, visto ter tendência em formar pontos duros. Assim, o seu teor nos latões para fundição não deve exceder os 0,05%.
- **Arsénio** – A utilização de teores baixos deste elemento, promove significativamente a resistência à dezincificação dos latões. Para valores percentuais acima de 0,2%, o arsénio provoca a deterioração das propriedades mecânicas dos latões.
- **Fósforo** – À semelhança do arsénio, o fósforo aumenta a resistência à dezincificação dos latões.
- **Antimónio e bismuto** – Estes elementos não devem exceder 0,01%, uma vez que deterioram as propriedades mecânicas dos latões.
- **Magnésio** – Tal como o manganês, é um notável desoxidante. Dada a sua forte tendência para a evaporação, às temperaturas de fundição do latão, as suas adições devem ser efetuadas pouco antes do vazamento.

### Liga de latão utilizada na Cifial

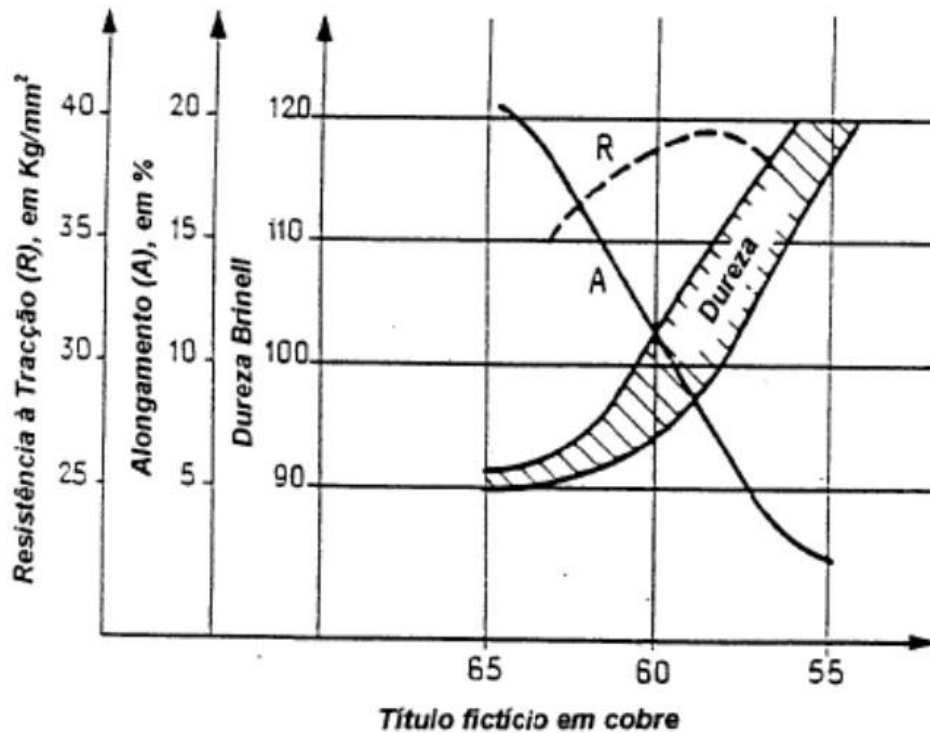
A liga utilizada na Cifial pode ser considerada como metal muntz, pois possui uma percentagem de Cu-Zn aproximada de 60%-40%, respetivamente, com os restantes e diversos elementos de liga a terem um peso de até 1,5% da percentagem total.

Através de duas fórmulas de cálculo e conhecidas as percentagens concretas de todos os elementos presentes na liga, é possível definir de uma forma mais correta as suas características, analisando os resultados no gráfico da figura 27.

As fórmulas de cálculo são conhecidas como o teor fictício ou equivalente em zinco e o título fictício (TF) em cobre, que se apresentam nas expressões seguintes (Castro e Junqueira 1996):

$$\%Zn_{equivalente} = \%Zn + 10 \times \%Si + 6 \times \%Al + 2 \times \%Sn + \%Pb + 0,9 \times \%Fe + 0,5 \times \%Mn - 1,2 \times \%Ni \quad (1)$$

$$TF(Cu) = \frac{100 \times Cu}{\%Cu + \%Zn + 10 \times \%Si + 6 \times \%Al + 2 \times \%Sn + \%Pb + 0,9 \times \%Fe + 0,5 \times \%Mn - 1,2 \times \%Ni + 2 \times \%Mg} \quad (2)$$



**Figura 27 - Propriedades mecânicas do latão em função do título fictício em cobre (Castro e Junqueira 1996).**

Quanto maior o título fictício em cobre, maior a ductilidade e menor a resistência à tração da liga de latão.

Outra importante característica, quando se trata de analisar uma liga que vai ser utilizada num processo de fundição, é a contração que esta sofre quando solidifica. Esta informação é fundamental para conhecer a compensação geométrica que deverá ser dada de forma a se obter uma peça fundida nas dimensões requeridas.

Segundo a informação retirada da tabela 9, uma forma genérica, considera-se que o latão tem uma contração de 1,4%.

**Tabela 9 - Contração aproximada de diferentes ligas após vazamento (ASM Handbook Committee 1998)**

Liga a ser vazada	Contração aproximada (%)
Aço	1,6
Ferro fundido cinzento	1,0
Ferro fundido dúctil	0,8
Alumínio	1,3
Latão	1,4

### 2.6.7.2 Defeitos de fundição associados ao processo de cera perdida

Uma vez que o objetivo do trabalho é produzir protótipos de torneiras, pelo processo de cera perdida, é natural que os primeiros modelos produzidos apresentem alguma espécie de defeito associado ao processo de fundição. Nesse sentido é importante ter presente os tipos de defeitos existentes, nomeadamente aqueles que dizem mais respeito a este tipo de fundição, bem como conhecer as causas e possíveis soluções para os mesmos.

Normalmente os defeitos das peças vazadas aumentam os efeitos das tensões, ou seja, diminuem as secções resistentes das peças, reduzindo assim a sua resistência às tensões quando a peça se encontra em serviço.

Alguns defeitos externos podem não ter qualquer efeito no desempenho da peça ou no tempo de duração em serviço da mesma. Porém, poderá exigir processos adicionais de correção, como por exemplo, a maquinagem, aumentando assim o custo de produção.

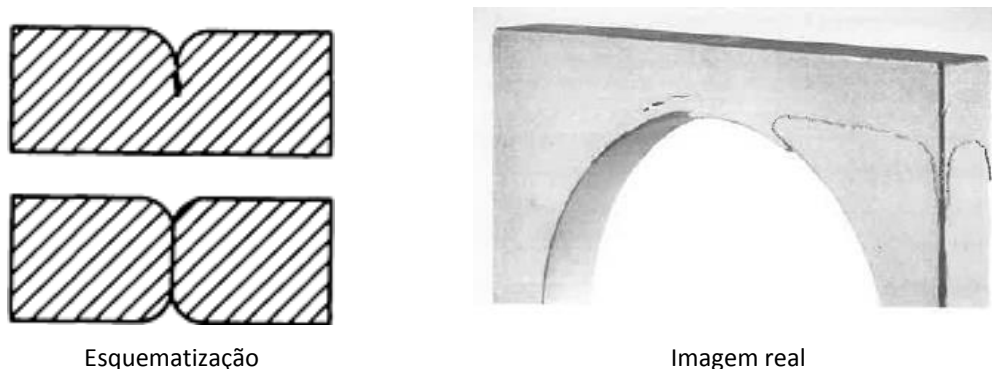
Os defeitos nas peças vazadas podem ter várias classificações em função da sua localização e causa provável. O Comité Internacional das Associações técnicas de Fundição identificou sete categorias básicas de defeitos de fundição (Institute 2004):

- Projeções Metálicas;
- Cavidades;
- Descontinuidades;
- Defeitos;
- Vazamentos incompletos;
- Dimensões incorretas;
- Inclusões ou anomalias estruturais.

Em seguida serão apresentados alguns defeitos encontrados em peças vazadas assim como as causa e algumas soluções propostas para a eliminação dos mesmos.

#### **Descontinuidades causadas por falta de fusão - “Cold Shut”**

Descrição do aspeto do defeito: Linhas ou arestas normalmente arredondadas indicando má ligação entre duas ou mais correntes de metal fundido (fig. 28).



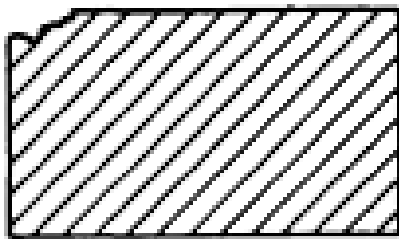
**Figura 28 - Esquematização e exemplo real de uma descontinuidade causada por falta de fusão (Institute 2004; ASMHandbookCommitee 1998)**

**Tabela 10 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação das discontinuidades causada por falta de fusão (Institute 2004)**

<b>Causas Prováveis</b>	<b>Medidas Corretivas Propostas</b>
Baixas temperaturas de vazamento do metal	Aumento da temperatura do metal e/ou do molde
Execução deficiente do vazamento	Aumentar o tamanho do restritor e/ou caudal de vazamento; Evitar salpicos
Mau dimensionamento do sistema de gitagem	Corrigir o sistema de gitagem de modo a assegurar o enchimento correto do molde
Má permeabilidade da carapaça cerâmica	Aumentar permeabilidade da carapaça e/ou incluir <i>vents</i>
Aumento de tensões superficiais devido a oxidação do metal	Fundir o metal em atmosfera controlada ou em vácuo
Baixa fluidez do metal	Modificar a composição da liga de modo a aumentar fluidez

### **Danos de corte do gito - “Cut off damage”**

Descrição do aspeto do defeito: Metal removido aquando a separação do gito da peça vazada; marcas da ferramenta utilizada no corte na superfície da peça (fig. 29).



Esquematização

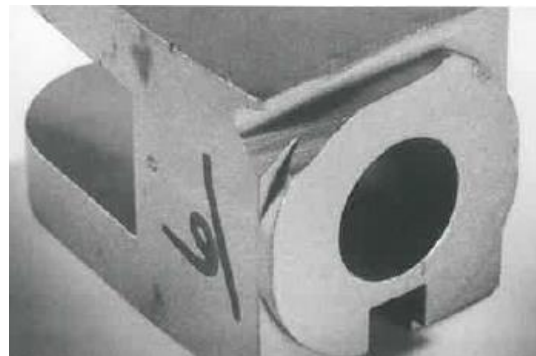


Imagem real

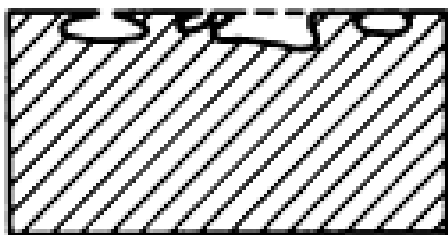
**Figura 29 - Esquematização e exemplo real de um dano causado por um corte deficiente do gito (Institute 2004; ASMHandbookComitte 1998)**

**Tabela 11- Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação dos danos de corte (Institute 2004)**

Causas Prováveis	Medidas Corretivas Propostas
Mau dimensionamento da árvore de modelos	Assegurar espaço suficiente para a ferramenta de corte; Aumentar o comprimento do gito
Ferramentas de corte desgastadas e/ou com defeitos	Manutenção preventiva das ferramentas de corte
Má fixação da peça aquando o corte do gito	Aperfeiçoar sistema de fixação de modo a minimizar os erros e a melhorar a segurança

### **Bolhas – “Gas”**

Descrição do aspeto do defeito: Cavidades, geralmente com formato esférico ou em gota, podendo conter ou não marcas de oxidação (fig. 30).



Esquematização



Imagem real

**Figura 30 - Esquematização e exemplo real de uma cavidade (Institute 2004; ASMHandbookComitte 1998)**

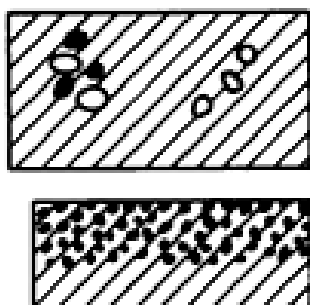
**Tabela 12 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação de bolhas ou poros (Institute 2004)**

Causas Prováveis	Medidas Corretivas Propostas
Desoxidação inadequada ou insuficiente	Retificar a técnica de desoxidação
Metal mantido a temperaturas muito elevadas por largos períodos de tempo	Controlar o tempo e temperatura; Vazar metal à menor temperatura possível
Materiais e/ou ferramentas em mau estado de conservação, molhadas ou contaminadas (cadinhos, fornos)	Limpar todo o material utilizado. Eliminar qualquer vestígio de humidade nos materiais refratários
Baixa permeabilidade da carapaça	Melhorar a permeabilidade da carapaça aplicando menos camadas; Aumentar o tamanho das partículas refratárias
<i>Burnout</i> inadequado	Aumentar o tempo e/ou temperatura de <i>burnout</i> ; Aumentar a atmosfera oxidante no forno



### **Retenção/aprisionamento de ar – “Gas (Air Entrapment)”**

Descrição do aspeto do defeito: Cavidades arredondadas com faces planas que podem conter marcas de oxidação na superfície (fig. 31).



Esquematização

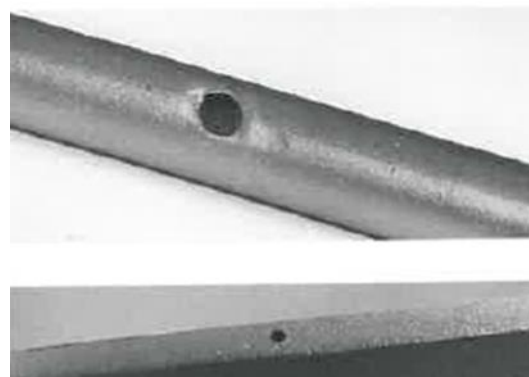


Imagem real

**Figura 31 - Esquematização e exemplo real com poros devido à retenção de ar (Institute 2004; ASMHandbookComitte 1998)**

**Tabela 13 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação de defeitos causados por retenção de ar (Institute 2004)**

<b>Causas Prováveis</b>	<b>Medidas Corretivas Propostas</b>
Fluxo de metal turbulento	Reduzir a altura de vazamento entre o cadinho e o molde Modificar sistema de gitagem de modo a reduzir a turbulência através da adição de alimentadores
Baixa permeabilidade da carapaça	Usar partículas refratárias grosseiras; Usar menos camadas; Vazamento em vácuo; Aumentar altura do gito

### **Escória “Slag”**

Descrição do aspeto do defeito: Conjunto de cavidades de formato irregular indicativo de presença de escória e/ou partículas refratárias (fig. 32).



Esquematização



Imagem real

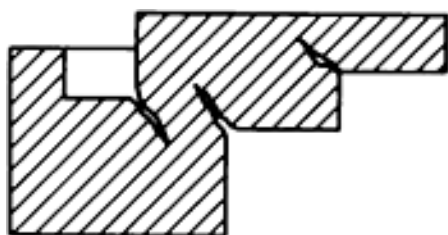
**Figura 32 - Esquematização e exemplo real das cavidades devido à presença de escória (Institute 2004; ASMHandbookComitte 1998)**

**Tabela 14 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação dos defeitos causados pela escória (Institute 2004)**

Causas Prováveis	Medidas Corretivas Propostas
Desoxidação inadequada ou insuficiente	Retificar a técnica de desoxidação
Metal mantido a temperaturas muito elevadas por largos períodos de tempo	Controlar o tempo e temperatura; Vazar metal à menor temperatura possível
Materiais e/ou ferramentas em mau estado de conservação, molhadas ou contaminadas (cadinhos, fornos)	Limpar todo o material utilizado. Eliminar qualquer vestígio de humidade nos materiais refratários
Presença de impurezas no metal a fundir (escórias, refratários, ferrugem nas superfícies)	Certificar que os lingotes de metal estão limpos antes da sua utilização. Melhorar condições de armazenamento
Partículas refratárias provenientes da entrada do forno e cadinho	Garantir que o forno e o cadinho não tem partículas refratárias soltas; Conservar o material limpo e em boas condições
Técnicas de desoxidação incorretas	Reduzir/otimizar o sobreaquecimento e a temperatura do fundido
Técnica de eliminação de escória incorreta	Proporcionar treino adequado ao técnico de fundição. Adicionar filtros para reduzir inclusões

### **Fenda ou fissura a quente “Hot tears”**

Descrição do aspeto do defeito: Descontinuidades irregulares com áreas suscetíveis a tensões; superfície da fratura aparece oxidada (fig. 33).



Esquematização

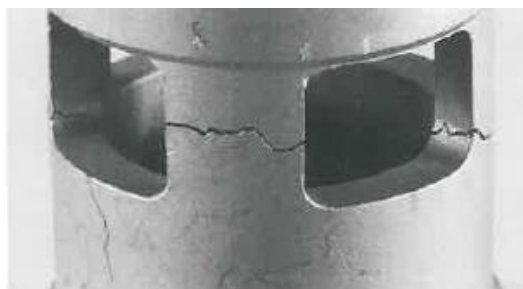


Imagem real

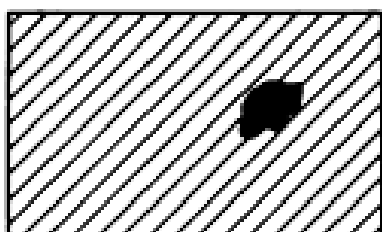
**Figura 33 – Esquematização e exemplo real de uma peça com uma fissura a quente (Institute 2004; ASMHandbookComitte 1998)**

**Tabela 15 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação de fissuras a quente (Institute 2004)**

<b>Causas Prováveis</b>	<b>Medidas Corretivas Propostas</b>
Contenção pelo sistema de gitagem	Retificar o sistema de gitagem.
Cantos vivos (interiores)	Atenuar os cantos vivos com o aumento dos raios
Mau <i>design</i> da peça	Eliminar secções muito grossas ou muito finas
Movimento da carapaça antes da solidificação da liga	Definir e cumprir tempo necessário para a solidificação da liga de modo a não movimentar a carapaça antes da solidificação da liga
Temperaturas incorretas do metal ou carapaça	Estabelecer e controlar as temperaturas adequadas
Arrefecimento rápido após vazamento (durante solidificação)	Aumentar tempo de arrefecimento isolando o molde
Composição química da liga incorreta	Modificar a composição química da liga

### **Inclusões – Inclusion**

Descrição do aspeto do defeito: Cavidades irregulares que contêm traços de refratários e/ou partículas de escória (fig.34).



Esquematização



Imagem real

**Figura 34 - Esquematização e exemplo real de uma peça com inclusões (Institute 2004; ASMHandbookComitte 1998)**

**Tabela 16 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação de inclusões (Institute 2004)**

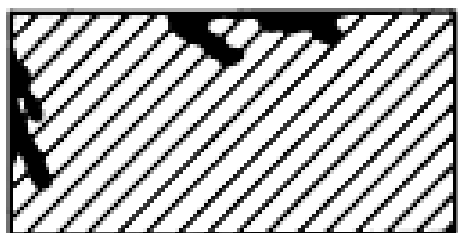
<b>Causas Prováveis</b>	<b>Medidas Corretivas Propostas</b>
Existência de areia ou partículas refratarias soltas na carapaça	Inspecionar e limpar a carapaça antes do vazamento
Lingotes do metal a fundir contaminado	Remover a ferrugem e todos os contaminantes à superfície do metal; Verificar a existência de escória na superfície ou de inclusões de areia

Causas Prováveis	Medidas Corretivas Propostas
Material externo proveniente dos cadinhos/conchas	Usar equipamento adequado e em boas condições. Manter o material livre de contaminantes
Escória retida durante o vazamento	Usar técnicas de desoxidação e de remoção de escória adequadas. Modificar canais de alimentação para a reduzir a turbulência
Presença de impurezas no metal a fundir (escórias, refratários, ferrugem nas superfícies)	Certificar que os lingotes estão limpos antes da sua utilização. Melhorar condições de armazenamento

Nota: O uso de filtros cerâmicos reduz os efeitos significativamente os defeitos derivados de inclusões.

### **Inclusões cerâmicas – “Ceramic Inclusion”**

Descrição do aspeto do defeito: Cavidades com formas irregulares e faces planas de tamanho indefinido que contêm traços de material cerâmico (fig. 35).



Esquematização



Imagem real

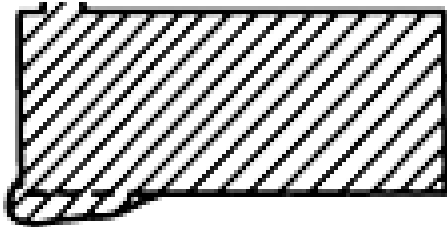
**Figura 35 - Esquematização e exemplo real de uma peça com inclusões cerâmicas (Institute 2004; ASMHandbookComitte 1998)**

**Tabela 17 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação de defeitos de inclusões cerâmicas (Institute 2004)**

Causas Prováveis	Medidas Corretivas Propostas
Espessura insuficiente da carapaça, características não controladas nos elementos que compõem o molde	Controlar e corrigir as características dos elementos que compõem o molde
Metal a fundir contaminado com refratários	Certificar que os lingotes estão limpos antes da sua utilização. Melhorar condições de armazenamento
Mau estado de conservação do forno de sinterização e dos cadinhos	Assegurar que fornos e os cadinhos não tem refratários soltos antes de fundir ou transportar o metal

**Excessivo metal devido à falha da carapaça – “Excessive Metal from Shell failure”**

Descrição do aspeto do defeito: Projeções de metal de forma irregular e de tamanho indefinido. Pode conter vestígios de material cerâmico com forma angular e irregular nas proximidades da falha da carapaça (fig. 36).



Esquematização

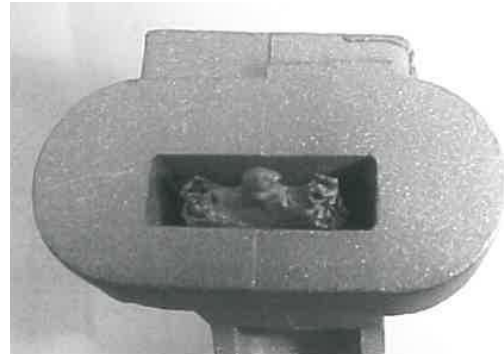


Imagem real

**Figura 36 - Esquematização e exemplo real de uma peça com defeitos de excesso de metal (Institute 2004; ASMHandbookComitte 1998)**

**Tabela 18 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação de defeitos de excesso de metal devido a falha da carapaça (Institute 2004)**

Causas Prováveis	Medidas Corretivas Propostas
Espessura insuficiente da carapaça, características não controladas nos elementos que compõem o molde	Controlar e corrigir as características dos elementos que compõem o molde

**Fratura do Molde – “Mold Cracking”**

Descrição do aspeto do defeito: Excesso de metal que segue o contorno da fissura da carapaça (fig. 37).



Esquematização

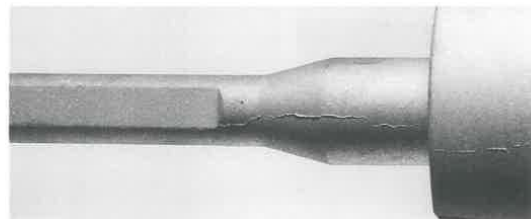


Imagem real

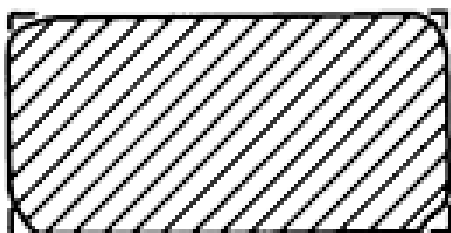
**Figura 37 - Esquematização e exemplo real de uma peça com defeitos derivados da fratura da carapaça (Institute 2004; ASMHandbookComitte 1998)**

**Tabela 19 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação de defeitos derivados da fratura da carapaça (Institute 2004)**

Causas Prováveis	Medidas Corretivas Propostas
Tempo de secagem excessivo entre as camadas primárias	Controlar e reduzir tempos de secagem entre as camadas
Surgimento de fissuras na operação de descerificação	Aumentar a temperatura do forno onde é efetuada a descerificação; Utilizar <i>vents</i>
Coeficientes de expansão diferentes das camadas primárias e das camadas seguintes	Usar refratários compatíveis
Baixa resistência da carapaça	Aumentar resistência da carapaça antes da sinterização

**Mau enchimento – “Non-Fill/ Misrun”**

Descrição do aspeto do defeito: Zonas com falta de metal e arestas arredondadas devido ao enchimento incompleto (fig. 38).



Esquematização

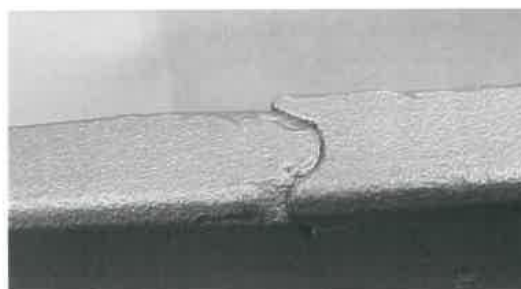


Imagem real

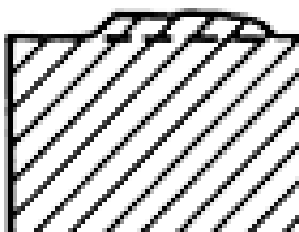
**Figura 38 - Esquematização e exemplo real de uma peça com defeitos derivados do mau enchimento (Institute 2004; ASMHandbookComitte 1998)****Tabela 20 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação de defeitos derivados do mau enchimento (Institute 2004)**

Causas Prováveis	Medidas Corretivas Propostas
Baixa temperatura do metal fundido ou da carapaça	Aumentar as dimensões do gito ou dos canais de alimentação
Falta de fluidez	Aumentar temperatura da carapaça e/ou da liga. Modificar a composição da liga para aumentar a fluidez
Vazamento interrompido	Certificar-se de que há condições para realizar um vazamento sem interrupções
Vazamento muito lento	Aumentar velocidade de vazamento

Causas Prováveis	Medidas Corretivas Propostas
Secções finas	Aumentar as secções de metal; estender as secções finas para posteriormente utilizar métodos de corte, para obter as dimensões do desenho
Baixa permeabilidade da carapaça e ausência de <i>vents</i>	Aumentar a permeabilidade da carapaça usando refratários mais grosso; utilizar menos camadas ou adicionar <i>vents</i>

### **Abatimento da camada primária da carapaça – “Primary Coat Buckle”**

Descrição do aspeto do defeito: Regiões com excesso de metal na superfície da peça vazada, normalmente associadas com a rebarba das arestas (fig. 39).



Esquematização



Imagem real

**Figura 39 - Esquematização e exemplo real de uma peça com defeitos derivados do abatimento da camada primária (Institute 2004; ASMHandbookComittee 1998)**

**Tabela 21- Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação de defeitos derivados do abatimento da camada primária (Institute 2004)**

Causas Prováveis	Medidas Corretivas Propostas
Fissuração da camada primária permitindo que a barbotina penetre entre o modelo em cera e as camadas; provavelmente causada por uma espessura irregular da camada primária, dando origem a diferentes tempos de secagem	Assegurar que o modelo em cera está bem lavado e que a camada primária tem boas propriedades molhante; Assegurar que as partículas refratárias estão a aderir adequadamente a toda a área da camada e que qualquer excesso é removido
Secagem da camada primária antes da aplicação da areia refratária	Controlar as condições de temperatura e humidade durante o processo de fabrico da carapaça
Esgorrimto demasiado rápido da barbotina primária em algumas secções originando variações de espessura	Assegurar viscosidade adequada da barbotina assim como uma cobertura e esgorrimto uniforme
Barbotina primária muito viscosa	Reduzir viscosidade
Validade da barbotina	Verificar pH e validade da barbotina

**Rabo de rato. “Rat tail”**

Descrição do aspeto do defeito: Linhas/ranhuras pouco profundas na superfície da peça vazada (pode apresentar oxidação nas ranhuras) (fig. 40).



Esquematização



Imagem real

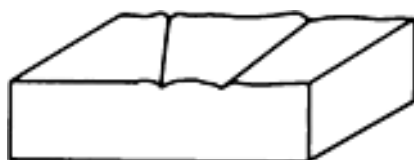
**Figura 40 - Esquematização e exemplo real de uma peça com defeitos designados por rabos de rato (Institute 2004; ASMHandbookComitte 1998)**

**Tabela 22 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação de defeitos rabo de rato (Institute 2004)**

Causas Prováveis	Medidas Corretivas Propostas
Temperatura elevada da carapaça e excessivo tempo de pré-aquecimento	Reduzir temperatura da carapaça
Fissuração da carapaça permitindo a entrada de ar que irá oxidar as fissuras durante o arrefecimento	Tapar a carapaça imediatamente depois do vazamento (Adicionar material rico em carbono antes de cobrir a carapaça é benéfico)

**Contração da carapaça – “Shell Buckle”**

Descrição do aspeto do defeito: Penetração de metal na área projetada como núcleo junto com a fissuração do molde antes do vazamento (rebarba fina) (fig. 41).



Esquematização

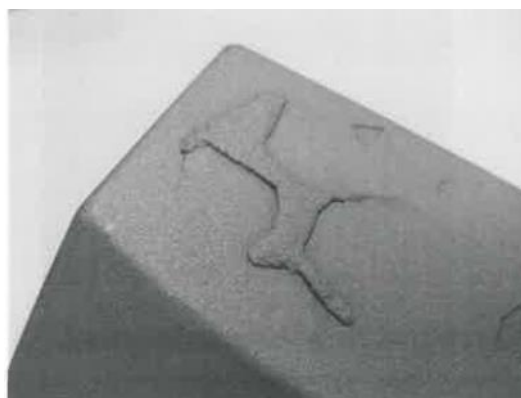


Imagem real

**Figura 41 - Esquematização e exemplo real de uma peça com defeitos devidos à contração da carapaça (Institute 2004; ASMHandbookComitte 1998)**

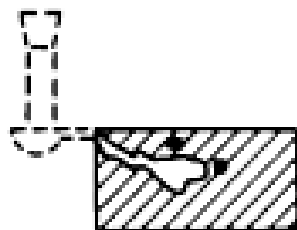


**Tabela 23 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação de defeitos derivados da contração da carapaça (Institute 2004)**

<b>Causas Prováveis</b>	<b>Medidas Corretivas Propostas</b>
Modelo em cera não tem resistência suficiente para suportar as operações de imersão na barbotina e polvilhamento da areia	Criar suportes adicionais
Expansão da cera durante o consolidação do molde e/ou secagem	Evitar flutuações de temperaturas durante a consolidação do molde e durante a secagem; Evitar secagem excessiva da camada primária; Assegurar método adequado de descerificação
Resistência inadequada do molde	Aumentar resistência da carapaça com camadas adicionais ou aumentar a percentagem de ligante nas misturas
Grandes superfícies planas	Diminuir as superfícies planas com a adição de nervuras e/ou relevos

**Contração no canal de gitagem – “Shrink in gate área”**

Descrição do aspeto do defeito: Grande cavidade irregular normalmente visível após remoção do gito (fig. 42).



Esquematização



Imagem real

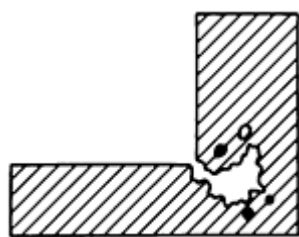
**Figura 42 - Esquematização e exemplo real de uma peça com defeitos designados derivados de contrações na área do gito (Institute 2004; ASMHandbookComitte 1998)**

**Tabela 24 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação devido a contrações na área do gito (Institute 2004)**

Causas Prováveis	Medidas Corretivas Propostas
Deficiente sistema de gitagem	Ajustar a dimensão da pia de vazamento.
Alimentação ineficiente	Utilizar canais de alimentação maiores e colocar alimentadores
Temperaturas de vazamento elevadas e com ar aprisionado	Reduzir temperatura de vazamento

### **Contrações nas superfícies - *Shrinkage (surface)***

Descrição do aspeto do defeito: Cavidades ou depressões irregulares que exibem marcas de oxidação à superfície (fig. 43).



Esquematização



Imagem real

**Figura 43 - Esquematização e exemplo real de uma peça com defeitos de contração na superfície (Institute 2004; ASMHandbookComitte 1998)**

**Tabela 25 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação devido a contrações na superfície (Institute 2004)**

Causas Prováveis	Medidas Corretivas Propostas
Pontos quentes	Melhorar sistema de gitagem – adição de alimentadores
Temperaturas de vazamento e/ou de pré-aquecimento da carapaça elevadas	Reduzir e controlar eficazmente as temperaturas para a liga vazada. Não mover as carapaças até o metal estar completamente solidificado

### **Marcas existente no modelo em cera *Wax Flow line***

Descrição do aspeto do defeito: A peça vazada apresenta irregularidades na superfície que lhe foram transmitidas pelo modelo em cera (fig. 44).



Esquematização

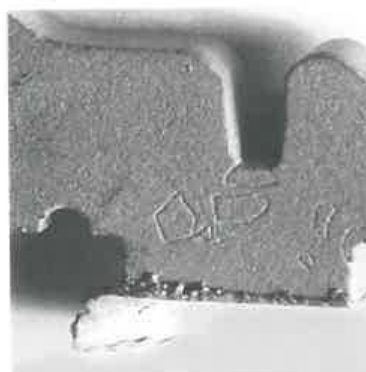


Imagem real

**Figura 44 - Esquematização e exemplo real de uma peça com defeitos derivados das marcas do modelo em cera (Institute 2004; ASMHandbookComitte 1998)**

**Tabela 26 - Causas e medidas corretivas propostas para a eliminação de defeitos derivados de marcas do modelo em cera (Institute 2004)**

<b>Causas Prováveis</b>	<b>Medidas Corretivas Propostas</b>
Uso excessivo de desmoldante	Verificar e controlar a qualidade e quantidade do desmoldante utilizado

## 2.7 Tratamentos e acabamentos

Na fase final de produção de uma torneira, estas sofrem alguns tratamentos que visam, não só o melhoramento das suas características mecânicas, como a resistência à corrosão e ao desgaste, com também torná-las mais atrativas para o consumidor final.

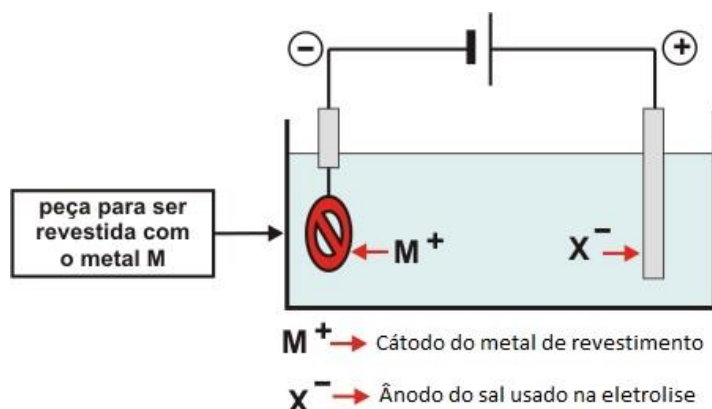
Os acabamentos mais comuns para este tipo de produto são: galvanoplastia, anodização e deposição física de vapor (PVD).

É importante salientar que antes da execução destes acabamentos as peças passam por uma operação de lavagem.

A lavagem é um processo de preparação da superfície que vai receber o acabamento e é normalmente variável consoante o tipo de tratamento que se vai utilizar.

### Galvanoplastia

A galvanoplastia é um processo eletrolítico que consiste em revestir superfícies de peças metálicas com outros metais, mais nobres e, tem como objetivo proteger a peça de metal da corrosão, bem como conferir melhor acabamento estético.



**Figura 45 - Esquemática do processo de eletrolise ocorrido na galvanoplastia (Alhanati)**

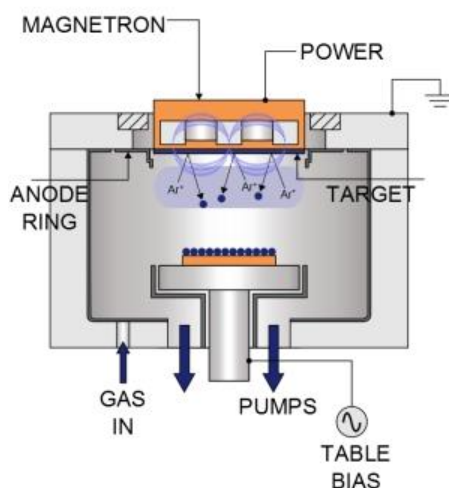
O processo de galvanoplastia é precedido por uma preparação da superfície que pode ser composta pelas seguintes fases: polimento; desgorduramento químico; desgorduramento eletrolítico; decapagem; ativação e neutralização.

Um dos processos galvânicos mais utilizados nas torneiras é a cromagem. A cromagem é um processo de aplicação de crómio sobre um material, geralmente metálico com o fim de tornar a sua superfície mais resistente à corrosão, para alterar as suas características elétricas ou apenas por motivos estéticos.

### Deposição Física de Vapor – PVD

O processo PVD modifica as propriedades das superfícies dos materiais. Este é usado em larga escala e é muito eficaz na melhoria das propriedades como a resistência ao desgaste, fricção e corrosão.

Este acabamento consiste num grupo de técnicas de deposição, as quais têm em comum, permitirem o transporte material no estado sólido entre o material do alvo e o substrato a ser revestido. O processo ocorre numa câmara rarefeita. De entre as principais técnicas PVD podem evidenciar-se a evaporação e a pulverização.



**Figura 46 – Esquemática de um modelo de uma câmara de PVD (OxfordInstruments)**

A evaporação térmica constitui no aquecimento do material a evaporar até alcançar a fase vapor, seguindo-se a condensação. Algumas das técnicas de revestimento por evaporação são: evaporação por efeito Joule, a evaporação por feixe de eletrões, a evaporação por arco elétrico e a evaporação por ablação laser.

Por sua vez, a pulverização consiste no bombardeamento do material do alvo com partículas energéticas. Este bombardeamento leva a que suceda ejeção de átomos do alvo por processos físicos de transporte de momento linear, os quais se depositam formando o revestimento. A pulverização é um grupo de técnicas, podendo-se destacar a pulverização catódica, a pulverização com magnetrão, a pulverização por rádio frequência, a pulverização com fonte pulsada, etc. As técnicas de pulverização permitem obter filmes com notável uniformidade (particularmente em grandes áreas), com superfícies suaves, em que se conseguem propriedades muito próximas das do material volumétrico. Os revestimentos apresentam boa adesão e as taxas de deposição são elevadas, quando comparadas à evaporação (Monteiro 2005).

### Anodização

A Anodização é um processo que tem por finalidade acelerar e controlar a formação de uma camada de óxido em certos metais por meio da imersão em um banho eletrolítico, no qual o metal a anodizar está ligado ao polo positivo de uma fonte de eletricidade, transformando-se no ânodo da cuba eletrolítica.

A maior parte dos produtos anodizados têm um tempo de vida extremamente longo oferecendo vantagens significativas do ponto de vista económico e de manutenção.

## **2.8 Controlo de qualidade**

A inspeção dos produtos de fundição é normalmente limitada à inspeção visual, verificação dimensional, verificação do peso e ensaios de dureza. Contudo, para peças com aplicações mais exigentes existem métodos de inspeção não destrutivos para comprovar a qualidade do produto.

De seguida irá ser apresentada uma breve abordagem de cada um dos ensaios mais usados no controlo de qualidade na fundição.

### Inspeção Visual

A inspeção visual utiliza-se, quer isoladamente, quer em conjunto com os restantes métodos de ensaios não destrutivos, sendo, igualmente, objeto de registo todas as observações efetuadas.

Por mais complexos que sejam os ensaios a realizar a uma determinada peça, o exame inicia-se sempre por uma operação de inspeção visual. A inspeção realiza-se quer por observação direta, quer utilizando equipamentos auxiliares como lupas ou microscópios.

Os requisitos fundamentais deste método são a limpeza e a iluminação adequada da peça a inspecionar.

No que toca à inspeção visual de peças vazadas, esta realiza-se imediatamente a seguir à operação de retirar a peça da moldação, e após o corte dos gitos e dos alimentadores de modo a permitir a realização de ações corretivas tão cedo quanto possível (F. P. Almeida 1991)



**Figura 47 – Inspeção Visual de uma peça recorrendo a um equipamento auxiliar (Tectudo)**

### Verificação dimensional

Desvios dimensionais em superfícies maquinadas são relativamente fáceis de avaliar e podem ser especificados com precisão. No entanto, não é tão simples determinar a aceitabilidade de dimensões que envolvem uma ou mais superfícies não maquinadas. O controlo dimensional pode ser realizado com o auxílio de instrumentos de medição, modelos e pode também ser assistido por computador.

Quando são detetados erros dimensionais em relação às especificações e tolerâncias gerais do projeto deve determinar-se o seu real significado. Uma dimensão particular pode ser de vital importância, mas esta pode ter sido não indicada ou ter uma tolerância em branco. Esta situação acentua a necessidade de fazer constar nos desenhos as dimensões funcionais, para que as tolerâncias não sejam reduzidas desnecessariamente (ASMHandbookCommittee 1998).

### Verificação do peso

Algumas peças vazadas tem geometrias complexas que se tornam difíceis de medir com precisão, em particular as secções internas. Todavia é importante garantir que estas secções tenham as espessuras corretas pelas seguintes razões:

- Não deve haver nenhum peso adicional que torne o produto final mais pesado que o permitido;
- Secções não devem ser mais finas do que foram projetadas, para evitar diminuir a resistência da peça.
- Se forem reduzidas as secções ocas através do aumento das espessuras, o fluxo de fluidos ou gases é reduzido.

Um método fácil de teste para estas discrepâncias é por pesagem exata de cada fundição, ou então calculando o deslocamento causada pela imersão do vazamento num recipiente de medição com líquido (ASMHandbookCommittee 1998).

### Ensaio de Dureza

Os ensaios de dureza são usados normalmente para verificar a eficácia dos tratamentos térmicos aplicados.

Estes consistem na impressão de uma pequena marca feita na superfície do material, com a ajuda de uma ponte de penetração. A dureza do material é quantificada utilizando uma das várias escalas que indicam, direta ou indiretamente, a pressão de contato envolvida para deformar a superfície de teste.

Uma vez que o penetrador é pressionado para dentro do material durante o teste, a dureza é também vista como a capacidade que um material tem para resistir a cargas de compressão.

O penetrador pode ser esférico (teste *Brinell*), piramidal (testes *Vickers* e *Knoop*), ou cônico (teste *Rockwell*). Nos testes de *Brinell*, *Vickers* e *Knoop*, o valor da dureza é a carga suportada por unidade de área da indentação (*MPa*). Nos testes de *Rockwell*, a profundidade da indentação, a uma carga prescrita, é determinada e convertida para um número de dureza (sem unidades de medida), este está inversamente relacionada com a profundidade (Kuhn e Medlin 2000).

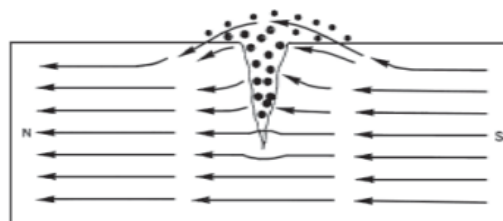
### Partículas Magnéticas

O método de inspeção por partículas é utilizada na deteção de descontinuidades superficiais e subsuperficiais em peças de materiais ferromagnéticos e aplica-se em 4 etapas:

- a. Magnetização da peça (por corrente elétricas ou por imanes);
- b. Aplicação de partículas magnéticas (por via seca ou via húmida);
- c. Inspeção;
- d. Desmagnetização (com corrente alternada ou com corrente continua).

Antes da operação de magnetização as peças devem ser limpas. O processo de limpeza não deve provocar alterações na peça a inspecionar. Estes habitualmente incluem a limpeza alcalina, desengorduramento por vapor de solvente e os métodos mecânicos (F. P. Almeida 1991).

O princípio de funcionamento deste método pode ser descrito da seguinte forma: aplicando um campo magnético a um material ferromagnético, as linhas do campo penetram no material e, caso haja algum obstáculo à sua passagem, elas tendem a contorná-lo. Desta forma, se o obstáculo estiver próximo da superfície, as linhas do campo saem da superfície material, ocorrendo assim uma fuga de fluxo. Quando são colocadas as partículas magnéticas, elas concentram-se nesta zona de fuga de fluxo, indicando assim o local onde se verifica a descontinuidade. (Magalhães 2009)



**Figura 48 – Peça magnetizada com partículas magnéticas na zona da fissura (Magalhães 2009)**

A atração será tanto maior quanto maior for o campo de fuga, ou seja, os campos de fugas intensos ou descontinuidades grandes fornecem indicações fortes enquanto que campos de fuga pouco intensos ou descontinuidades finas fornecem indicações fracas.

As principais vantagens deste método são (F. P. Almeida 1991):

- Simplicidade de aplicação em materiais ferromagnéticos;
- Detecção de descontinuidades subsuperficiais;
- Produção de indicações diretamente na superfície da peça;
- Aplicabilidade em peças com geometrias complexas.

No entanto apresenta algumas desvantagens como:

- Aplicação exclusiva em materiais ferromagnéticos;
- Exigência da operação de magnetização em algumas situações.

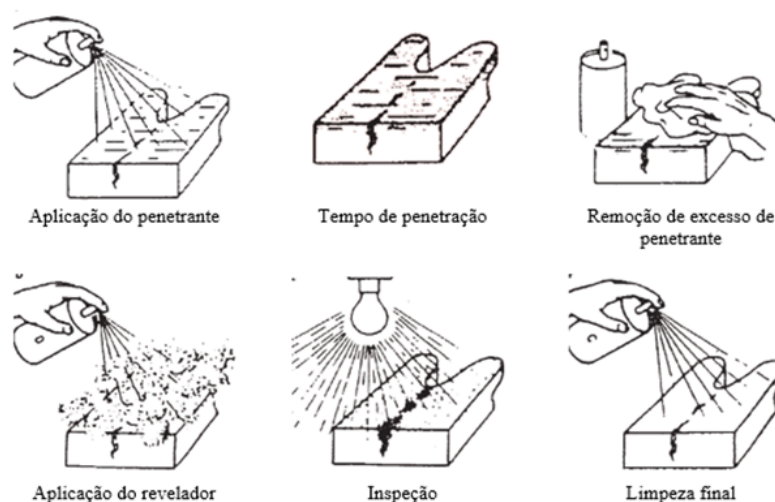
### Líquidos Penetrantes

O método de ensaios por líquidos penetrantes aplica-se na deteção de descontinuidades abertas à superfície em materiais sólidos não porosos. Esta técnica permite detetar descontinuidades, quer microscópicas, quer visíveis à vista desarmada.

O ensaio baseia-se na utilização de um líquido – penetrante – que é aplicado sobre a superfície previamente limpa da peça a inspecionar e que por capilaridade preenche as descontinuidades existentes na superfície.

O líquido penetrante permanece algum tempo na superfície da peça sendo removido o excesso. A aplicação de um produto absorvente – revelador – aumenta a visibilidade das indicações.

O método de líquidos penetrantes utiliza-se tanto em materiais magnéticos, como ligas de alumínio, de magnésio, bronzes, latões, plásticos, vidros ou cerâmicos; em materiais forjados ou vazados (F.P. Almeida 1991).



**Figura 49 - Esquematização das etapas de inspeção por líquido penetrante (Santos 1999)**



As principais vantagens do método referido são (F.P. Almeida 1991):

- Permite a deteção de descontinuidades muito pequenas mesmo em peças de geometria complexa (F.P. Almeida 1991);
- Pode ser utilizado numa vasta gama de materiais;
- Utiliza equipamentos simples e não necessita de grandes investimentos;
- Permite a inspeção a 100% de um lote pequeno de peças.

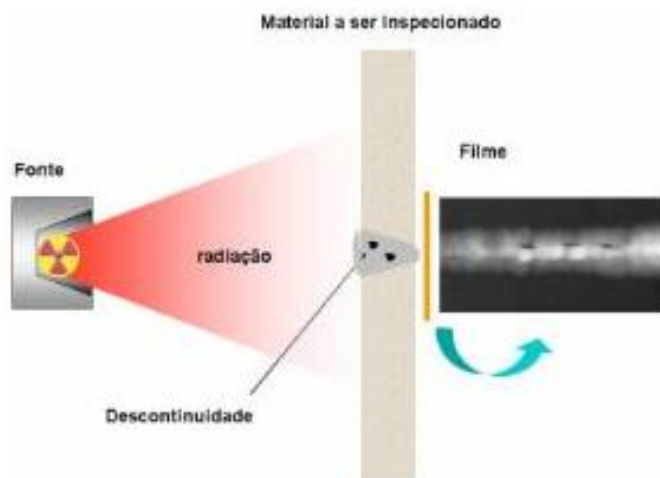
Por outro lado, este ensaio apresenta as seguintes desvantagens (F.P. Almeida 1991):

- Deteção exclusiva de descontinuidades abertas à superfície;
- Exige que a superfície a inspecionar bem como o interior das descontinuidades estejam absolutamente limpas e isentas de contaminantes;
- Os materiais penetrantes, emulsificadores e reveladores são tóxicos e exigem precauções no manuseamento;
- Não é aplicável a materiais porosos.

### Métodos Radiológicos

O método de ensaio não destrutivo, utilizando radiações penetrantes, quando bem executado, dá origem a informações claras, objetivas e fiáveis através da radiografia.

A radiologia baseia-se na absorção diferenciada da radiação penetrante pela peça em inspeção. Devido às diferenças na densidade e variações na espessura do material, ou mesmo diferenças nas características de absorção causadas por variações na composição do material, diferentes regiões de uma peça absorverão quantidades diferentes da radiação penetrante. Essa absorção diferenciada da radiação poderá ser detetada através de um filme, ou através de um tubo de imagem ou mesmo medida por detetores eletrónicos de radiação. Essa variação na quantidade de radiação absorvida, detetada através de um meio, irá indicar, entre outras coisas, a existência de uma falha interna ou defeito no material (Andreucci 2003)



**Figura 50 - Esquematização dos três elementos base constituintes de um ensaio radiológico (Andreucci 2003)**

Existem dois tipos de radiação eletromagnética utilizada na inspeção radiológica: raios-X e os raios- $\gamma$ . Estes dois tipos de raios são formas de energia radiante da qual diferem apenas dos outros tipos devido ao seu extremamente reduzido comprimento de onda.

Apenas os raios X e  $\gamma$  devido ao seu tamanho de onda são capazes de penetrar materiais opacos para revelar os seus defeitos internos (Miracle et al. 2001).

Os raios-X produzem-se quando um feixe de eletrões, de alta energia choca com uma placa de metal, e tem como origem os átomos desse metal. Os raios- $\gamma$  por sua vez têm origem no núcleo de certos elementos radioativos e provêm portanto da desintegração espontânea desses núcleos atômicos.

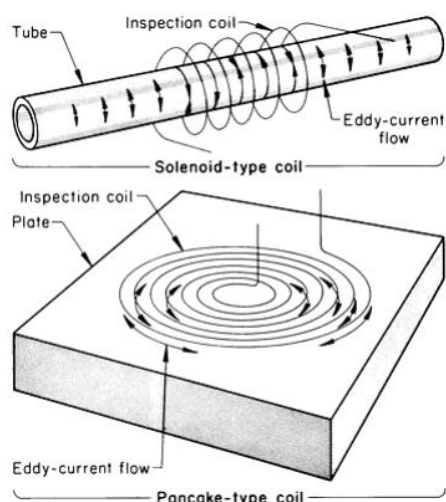
Estes dois tipos de raios ao atravessarem os materiais, as radiações são absorvidas, estando esta absorção em relação direta com a espessura e a massa específica dos materiais em causa. A intensidade das radiações emergentes é variável e esta variação é detetada e/ou registada usando a película fotossensível (F. P. Almeida 1991).

Apesar de ser indiscutivelmente um dos melhores processos para caracterizar defeitos volúnicos, uma das suas limitações reside na reduzida sensibilidade de deteção de defeitos planos, como por exemplo fissuras localizadas em planos geométricos não coincidentes com a direção do feixe de radiação. Apesar desta limitação é um dos métodos mais eficazes para detetar falhas não planares. Quando comparado com outros métodos não destrutivos, os ensaios radiológicos apresentam três grandes vantagens (Miracle et al. 2001):

- A eficácia na deteção de falhas internas;
- A eficácia na deteção de variações significativas na composição;
- Arquivo permanente dos dados de inspeção através da radiografia.

### Métodos Elétricos Correntes Induzidas

O ensaio por correntes induzidas, denominado na terminologia inglesa por Correntes Eddy, baseia-se na medição da variação da impedância elétrica de uma bonina (sonda), sujeita a um campo magnético (F.P. Almeida 1991).

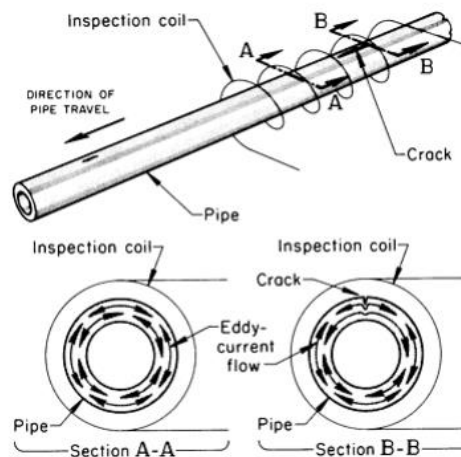


**Figura 51 - Esquematização de dois tipos de bobinas de inspeção e padrões do fluxo das correntes de Eddy geradas (Kuhn e Medlin 2000)**

Quando a bobina é percorrida por uma corrente elétrica alternada, cria-se um campo magnético primário, o qual induz uma corrente elétrica numa peça condutora que seja colocada na sua proximidade.

A corrente induzida na peça, como qualquer corrente elétrica, cria um campo magnético secundário que contraria o campo primário bem como induz corrente na bobina que constitui a sonda. Nestas condições, tanto a corrente primária como o campo magnético primário reduzem-se, quando comparados com os que se obtém na ausência de peça condutora. Esta variação é equivalente a um aumento da resistência e a uma diminuição da indutância primária. Resulta assim uma variação da impedância da bobina, esta variação permite registar (F.P. Almeida 1991):

- Medição de condutividade elétrica, da permeabilidade magnética;
- Variações estruturais;
- Detecção de defeitos como fissuras, corrosão, inclusões entre outros.
- Variações dimensionais como por exemplo perda de espessura;
- Distinção de materiais com composição química variada;
- Medição da espessura de camadas protetoras condutoras ou não-condutoras



**Figura 52 – Esquematização do efeito de uma fissure no padrão do fluxo das correntes de Eddy num tubo (Kuhn e Medlin 2000)**

Os principais fatores que influenciam o ensaio por correntes induzidas são (Miracle et al. 2001):

- Efeito de pele;
- Condutividade elétrica;
- Permeabilidade magnética;
- Distância ao condutor (*lift-off*)
- Coeficiente de enchimento;
- Efeito de bordo.

### Ultrassons

A utilização de ultrassons baseia-se na transmissão de ondas sonoras de elevada frequência, num material que constitui a peça a inspecionar, as quais refletem ao incidirem numa

superfície de separação de dois meios com características acústicas diferentes, como por exemplo uma descontinuidade. As reflexões, quando recebidas, permitem detetar e localizar na peça os refletores, através do conhecimento do tempo de percurso, velocidade de propagação do som e ângulo de emissão.

O grande objetivo deste ensaio está fundamentalmente orientado para a deteção de defeitos de fabrico, como as inclusões (escória e areia), porosidades e cavidades de contração. Menos frequente é o controlo de defeitos de serviço, como fissuras de fadiga.

As principais vantagens deste método são (F.P. Almeida 1991):

- Elevado poder de penetração permitindo assim a deteção de descontinuidades no interior das peças para uma vasta gama de espessuras;
- Sensibilidade elevada na deteção de descontinuidades muito pequenas;
- Precisão na determinação da localização, dimensão e da forma da descontinuidade;
- Não exige mais do que uma superfície acessível para a colocação da sonda;
- Aplicável em verificações de manutenção;
- Equipamento normalmente portátil:

No entanto existem alguns inconvenientes como (F.P. Almeida 1991):

- Exige operadores muito experientes;
- Difícil de aplicar em peças com geometrias muito complexas ou espessuras muito baixas;
- Dificuldade de aplicação em materiais de grande atenuação acústica;
- Apresenta por vezes dificuldades nas interpretações dos defeitos superficiais
- Exige a utilização de acoplantes.

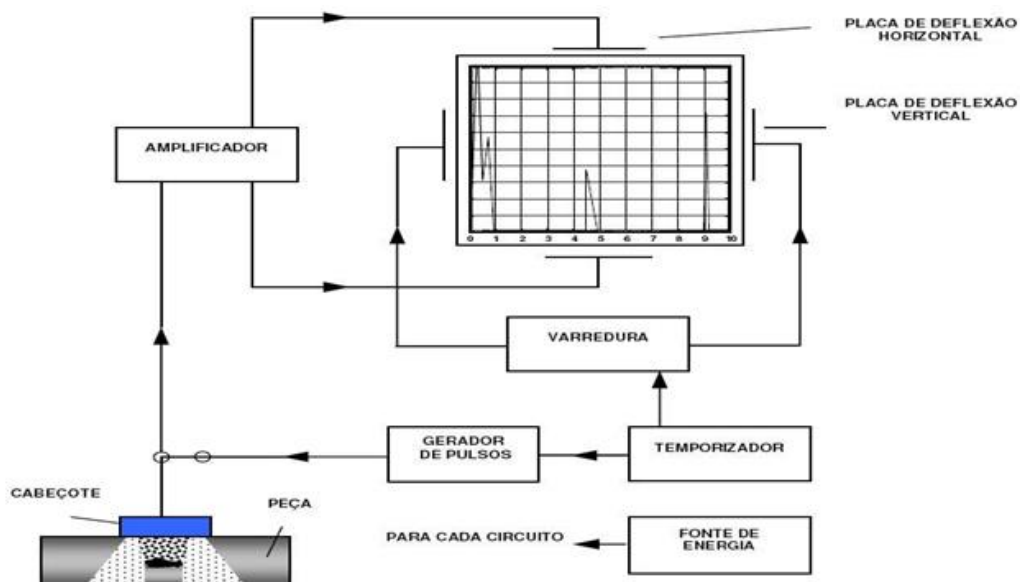


Figura 53 – Diagrama de blocos de equipamento de ultrassons (Santos 1999)

### Verificação da estanquicidade

As torneiras são um bom exemplo da aplicação deste teste. As peças vazadas destinadas a resistir a altas pressões podem ser testadas para verificar se tem algum tipo de fugas. De acordo com o tipo de metal usado, existem vários métodos para realizar esta verificação.

Um dos ensaios consiste em introduzir ar a uma pressão específica para o interior da peça e, em seguida, submergir a mesma em água a uma dada temperatura. A existência de fugas é revelada pela libertação de bolhas de ar. Um método alternativo é preencher as cavidades da peça com parafina a uma dada pressão. A parafina irá penetrar nas fissuras ou porosidades revelando através de manchas oleosas ou húmidas a posição do defeito (ASMHandbookCommittee 1998)

### Metalografia

O ensaio metalográfico é uma das técnicas mais simples e eficaz para a caracterização dos materiais. O recurso a este tipo de ensaio é importante pois permite analisar a estrutura do material em estudo e perceber qual a qualidade do mesmo, se apresenta fases indesejáveis que comprometam as suas principais propriedades mecânicas (Magalhães 2009)

O exame metalográfico pode ser (Nascimento):

- Macrográfico: consiste na análise do aspeto de uma superfície plana seccionada de uma peça ou amostra metálica, devidamente polida e atacada por um reagente adequado. Por seu intermédio tem-se uma noção de conjunto, referente à homogeneidade do material, à distribuição e natureza de falhas, impurezas; ao processo de fabricação.
- Micrográfico: constitui no estudo dos produtos metalúrgicos, com o auxílio do microscópio, permitindo observar a granulação do material, a natureza, forma, quantidade e distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões, etc. Estas observações são de grande utilidade prática



**Figura 54 - Exemplo de um laboratório/equipamento para realização de metalografia (COPPE/UFRJ)**



### 3 Trabalho Experimental

#### 3.1 Introdução

A parte experimental deste trabalho tem como finalidade aferir se o processo de cera perdida é adequado para a produção de protótipos de torneiras com exigentes características dimensionais, nomeadamente no que diz respeito ao volume interior que é composto por uma secção pequena, ao longo de um comprimento elevado. Percorrendo todas as etapas necessárias, desde a criação ou obtenção de um desenho de uma torneira, até à sua materialização na liga pretendida, é assim possível desenvolver uma metodologia que defina os procedimentos e os materiais escolhidos.

O processo de fundição de cera perdida, na vertente de criação de novos produtos, deverá ser entendido e tomado como um projeto evolutivo. Nesse sentido e neste caso em concreto, ao projetar torneiras, estas deverão apresentar um *design* inovador e apelativo, usufruindo da complexidade que o processo de fundição permite, sem esquecer aquele que é um dos elementos mais problemáticos – o espaço oco que se encontra no interior da torneira e é necessário obter. Assim, o processo de produção de protótipos incluiu modelos maciços e ocos, sendo os primeiros considerados testes importantes na medida em que permitem validar o conceito e as características inerentes ao processo, e os segundos considerados um degrau evolutivo no processo.

Relativamente ao trajeto que deverá ser percorrido na criação dos protótipos das torneiras, há desde logo uma bifurcação no caminho. Após modelação CAD 3D do modelo de torneira pretendido, há duas opções a serem consideradas: ou se opta pelo método de conversão indireto, ou escolhe-se o método de conversão direto.

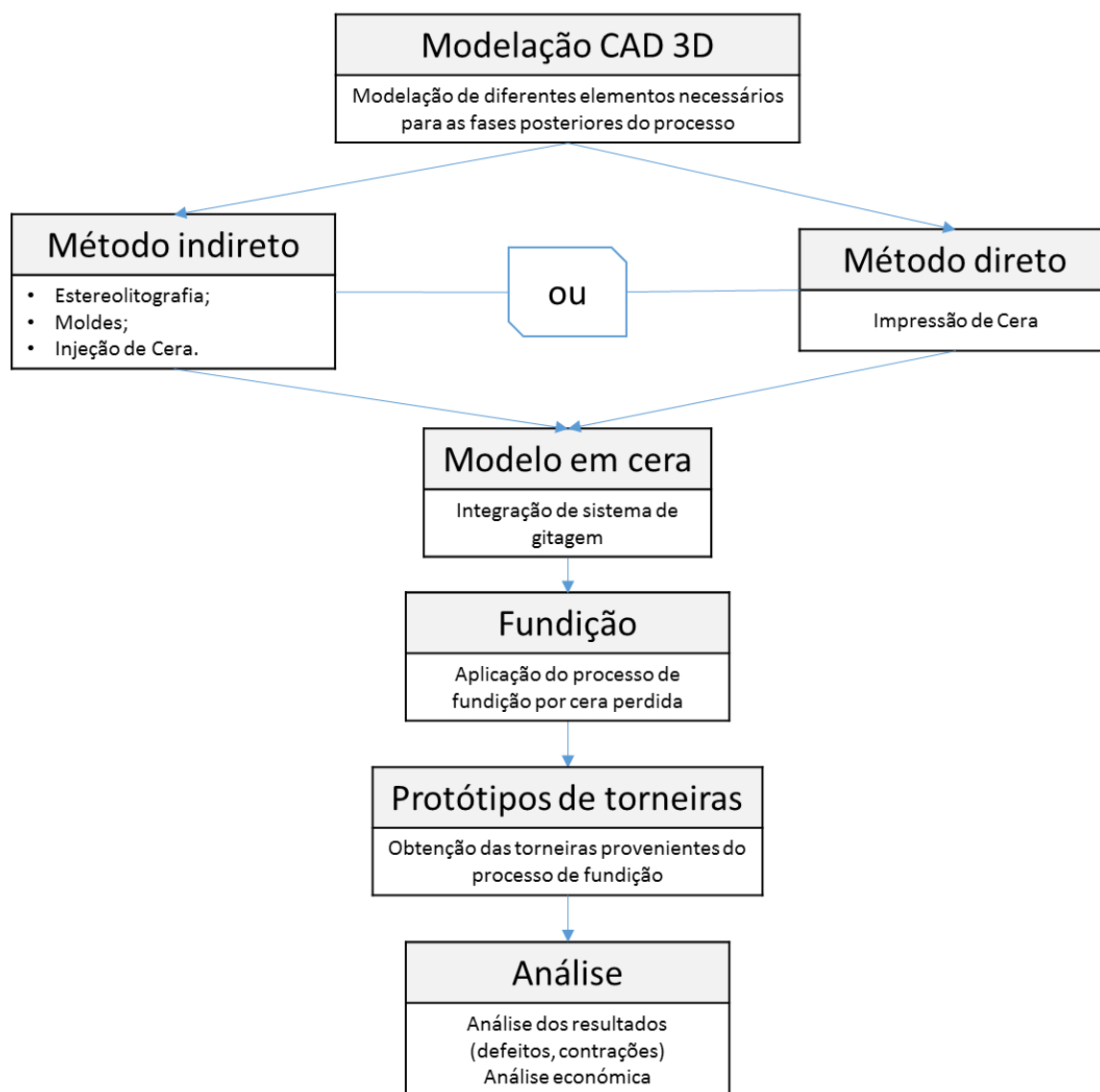
No método de conversão indireto constroem-se modelos em estereolitografia, que por sua vez vão servir de elemento de apoio à construção de um molde de injeção de ceras. Injetando cera, obtém-se o modelo em cera pretendido. Apesar de ser um método lento e caro, para produzir apenas um modelo, torna-se uma solução bastante atrativa ao proporcionar a facilidade de produzir inúmeros modelos, sendo estes produzidos por injeção a um custo reduzido.

Quando ao método de conversão direta a cera é impressa diretamente, obtendo-se logo o modelo em cera. É um método mais rápido (apesar da impressão ser lenta), no entanto cada vez que é necessário outro modelo, é obrigatório imprimir, uma vez que o anterior é perdido no processo de fundição.

Uma vez que o título e objetivo principal do trabalho se trata de definir a metodologia mais indicada para a produção de protótipos de torneiras, ambos os métodos devem ser implementados e analisados. A escolha entre as duas opções deverá ser feita sobretudo por

motivos económicos, sendo importante conhecer a partir de que número de peças compensa optar por um ou outro método.

O trabalho experimental passa então por seguir as etapas, descritas resumida e sucintamente na figura 55, seguindo as duas alternativas mencionadas para a produção de modelos em cera.



**Figura 55 – Etapas alternativas percorridas para o processo de fabrico de protótipos de torneiras**

### 3.2 Modelação CAD 3D dos Protótipos

A primeira etapa na obtenção de um protótipo passa pela realização de esboços e desenhos da peça idealizada. Alternativamente, pode-se recorrer a desenhos já existentes ou mesmo a modelos físicos de torneiras já presentes no mercado, recorrendo para isso à engenharia inversa.



Neste caso em concreto, diversas criações e desenhos foram considerados, chegando alguns deles a ser modelados. A torneira utilizada e escolhida como referência para o projeto de materialização do protótipo baseou-se num desenho proposto pela empresa Cifial. Como é possível observar na figura 56, a torneira tem uma geometria aparentemente de linhas simples, contrastando com as espessuras interiores que são mínimas e se adivinham exigentes do ponto de vista do processo de fundição.

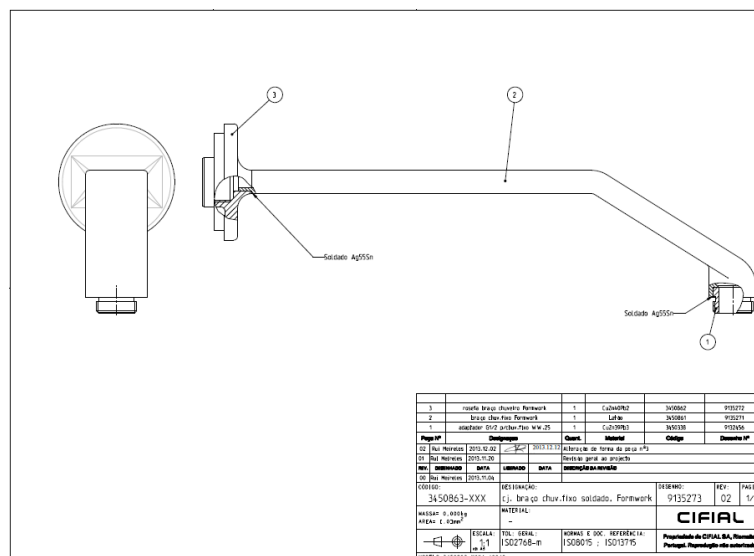


Figura 56 - Desenho da torneira fornecido pela Cifial

Como um dos objetivos pretendidos é definir uma metodologia específica que permita ao INEGI o fabrico de protótipos de torneiras e eventualmente divulgá-las, achou-se apropriado não replicar diretamente a torneira da Cifial. Nesse sentido, foram consideradas algumas mudanças de geometria (fig. 57), que permitissem obter um desenho considerado suficientemente original e distanciado do que lhe deu origem.

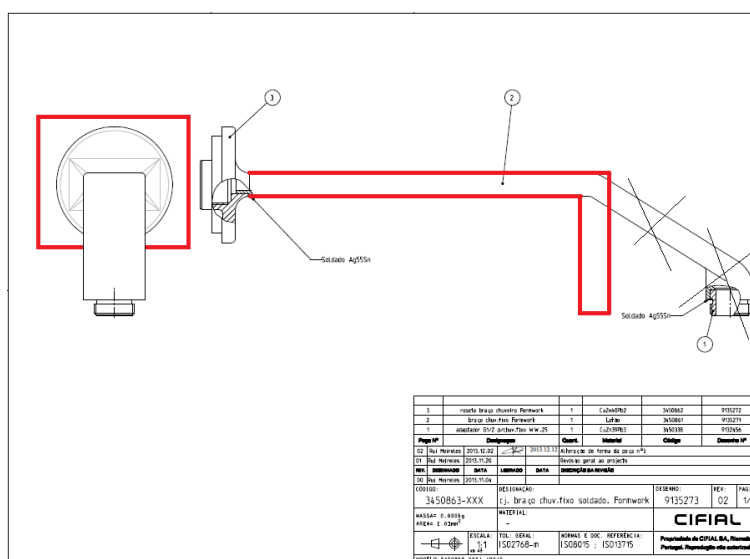
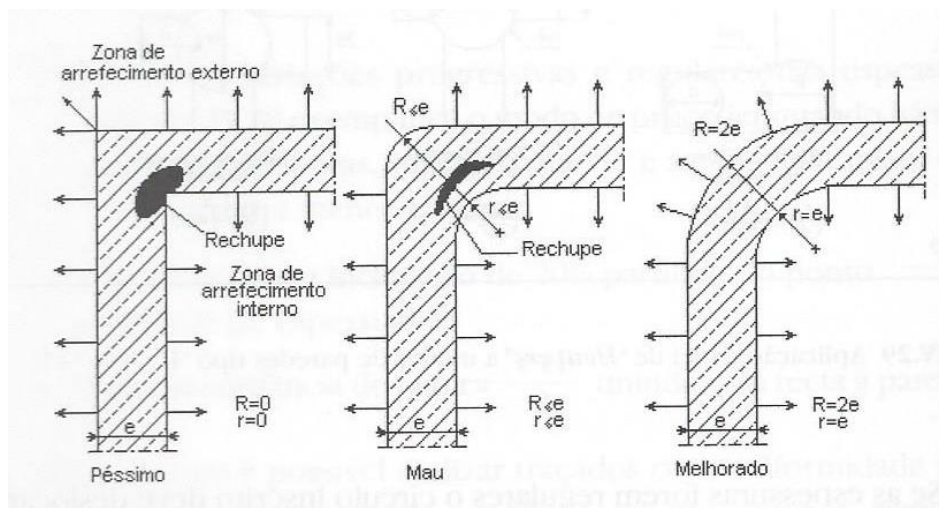


Figura 57 – Esboço da torneira da Cifial com as alterações propostas

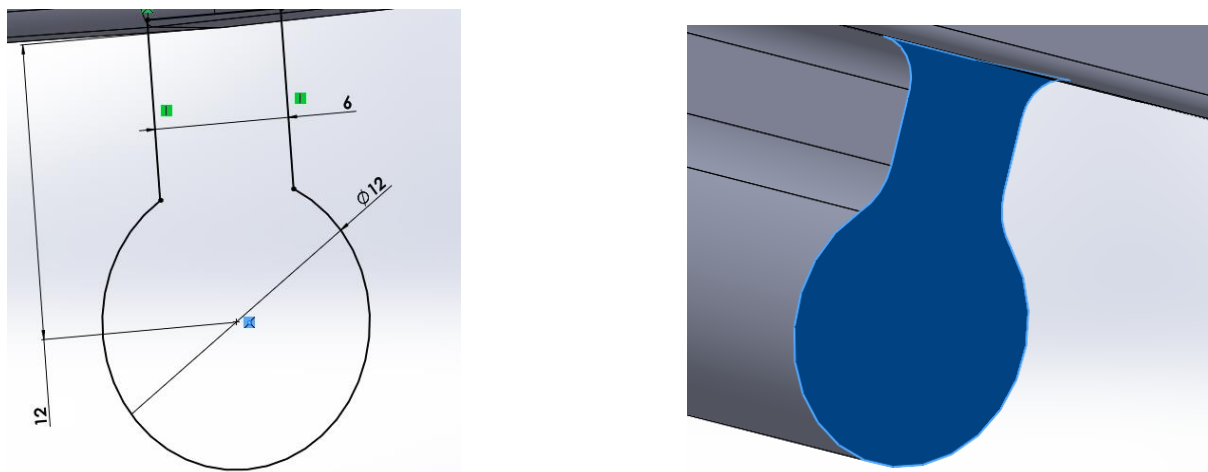
Uma vez que as medidas referenciadas no desenho eram de uma peça finalizada, foi considerada uma sobre espessura generalizada de 1 mm possibilitando que, após as eventuais operações de acabamento aplicadas à torneira, como maquinagem, as medidas do CAD tivessem correspondência às medidas reais da peça finalizada.

Antevendo defeitos inerentes ao processo de fundição, foram tidos em conta raios de concordância (fig. 58). Uma vez que o modelo teria uma versão em estereolitografia, que por sua vez iria gerar um molde, contra saídas de pelo menos 1% que permitissem a desmoldação foram consideradas.



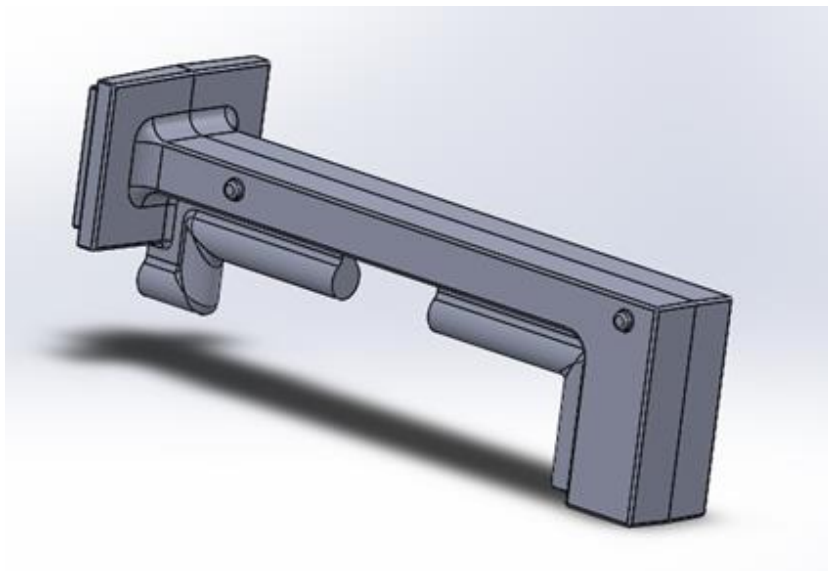
**Figura 58 – Raios de concordância para evitar defeitos de fundição (Ferreira 1999)**

Na modelação CAD 3D foi também considerada a inclusão da parte do sistema de gitagem que está em contato direto com a torneira. Para além de ser fundamental a sua integração para o correto enchimento da futura peça vazada, a parte que está em direto contato foi realizada já nesta fase para evitar eventuais deformações no modelo, que aconteceriam caso se fosse inserida manualmente com o restante sistema de gitagem. Este “canal” deve ser colocado numa seção apropriada, idealmente numa zona não tão visível da torneira. O perfil utilizado pode ser verificado na figura 59.



**Figura 59 – Criação do perfil do canal de gitagem em contato direto com a torneira**

Com as medidas de referência, as alterações de geometria devidamente validadas e consideradas as restantes particularidades referidas anteriormente procedeu-se à modelação CAD 3D da torneira, que resultou no modelo apresentado na figura 60, nesta fase ainda um modelo maciço.



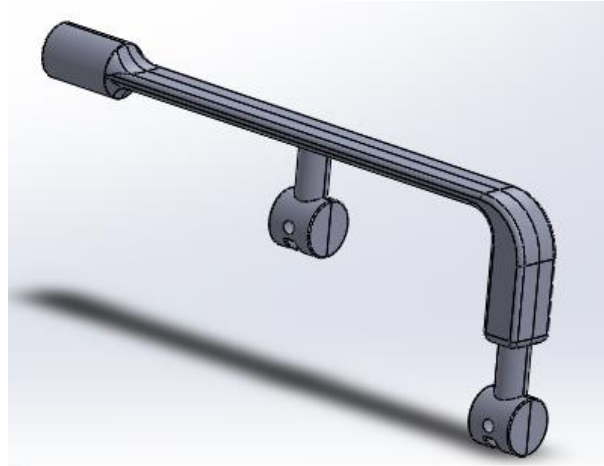
**Figura 60 - Torneira modelada em CAD 3D**

A importância dos modelos maciços, como referido anteriormente, é servirem de validação de conceito e confirmação de certos parâmetros do processo de produção como por exemplo:

- Desenho do sistema de gitagem;
- Número de camadas e sua composição para a construção da carapaça;
- Temperaturas do processo de fundição.

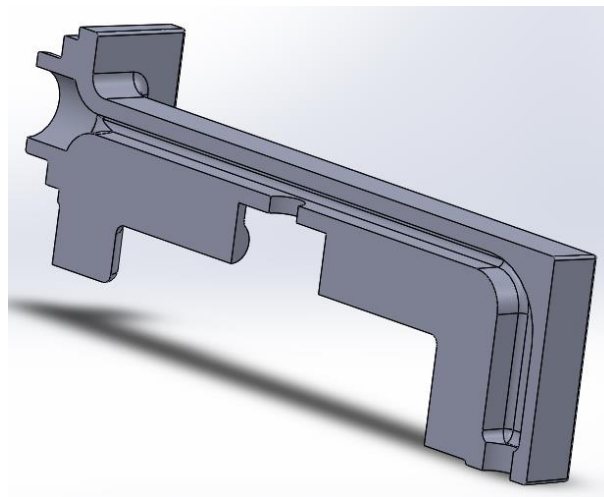
Nesse sentido optou-se por materializar também modelos de torneiras maciças, para além dos modelos ocos. As torneiras ocas diferem das maciças, essencialmente pela possibilidade de passagem de água pelo seu interior, sendo possível que no final do processo de produção sejam consideradas funcionais.

Retomando a geração do modelo CAD 3D havia duas alternativas em termos de modelação do modelo oco: ou se retirava material diretamente do modelo da torneira, ou modelava-se esse volume interior, de forma independente, optando por subtraí-lo na torneira maciça. A opção tomada foi a segunda, uma vez que em termos construtivos se obtinha a modelação do denominado macho, necessário na fabricação do respetivo molde. Antevendo as condições de fabrico dos modelos em cera, o macho foi modelado com impressos que permitissem mantê-lo numa posição adequada e fixa, para que, quando fosse colocado no molde da torneira, a injeção da cera não o movimentasse.



**Figura 61 - Macho da torneira com impressos em CAD 3D**

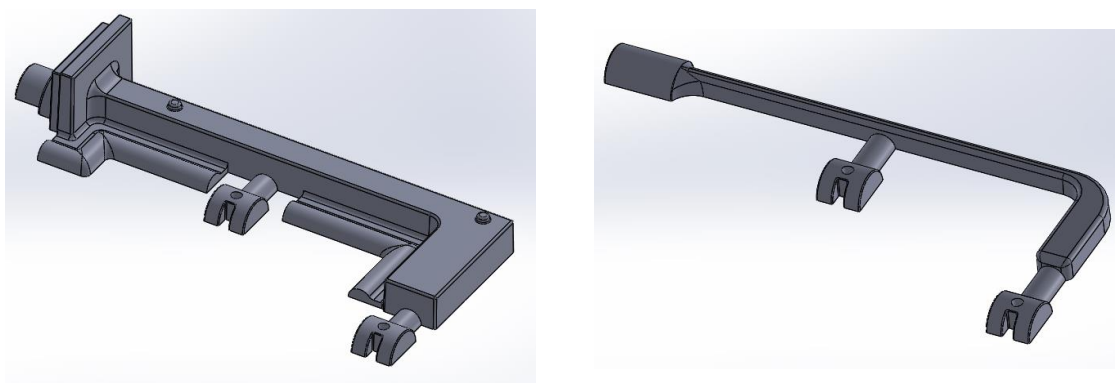
Estando o macho definido foi possível obter a forma final da torneira oca. A figura 62, com vista em corte, demonstra o aspeto da torneira que se pretende obter.



**Figura 62 - Vista em corte da torneira oca modelada em CAD 3D**

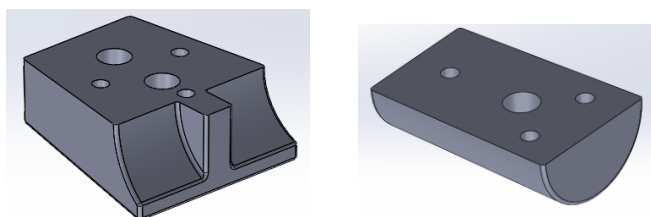
A partir dos ficheiros modelados foi possível construir elementos que iriam auxiliar o restante processo de fabrico, tais como:

- Elementos de apoio da construção dos moldes em estereolitografia (fig. 63);



**Figura 63 - Elementos de apoio utilizados na estereolitografia**

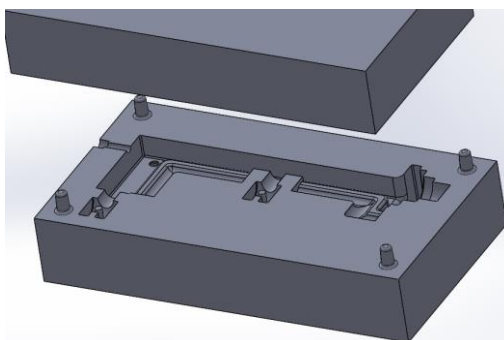
Adicionalmente, foram criados mais duas peças, para funcionarem como tacos no molde do macho. O propósito é que para além da utilização de cera solúvel como material do macho, fosse possível, como alternativa, injetar areia ou noutro material opcional, tendo os tacos a função de suportar eventuais pressões resultantes e permitir a injeção de diferentes lados.



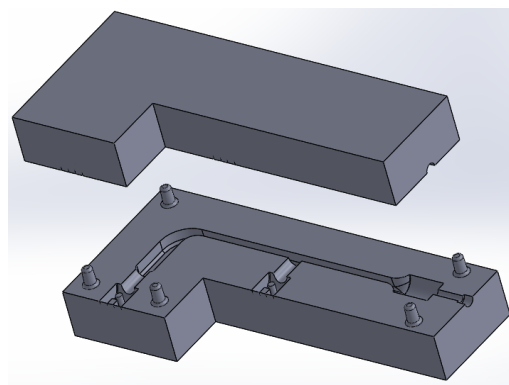
**Figura 64 - Tacos integrados no molde do macho**

Devido ao processo de fabrico dos moldes para injeção de cera (que são realizados 2 meias moldações), foi necessário dividir as peças modeladas a meio, pelo plano de apartação. Nesse plano foram criados furos, que serviam de referência, aquando da criação do molde, nomeadamente na fase de criação da segunda moldação. Mais à frente será descrita essa fase do processo.

- Moldes da torneira e macho, para a injeção das ceras, modelados em CAD 3D (fig. 65 e 66);

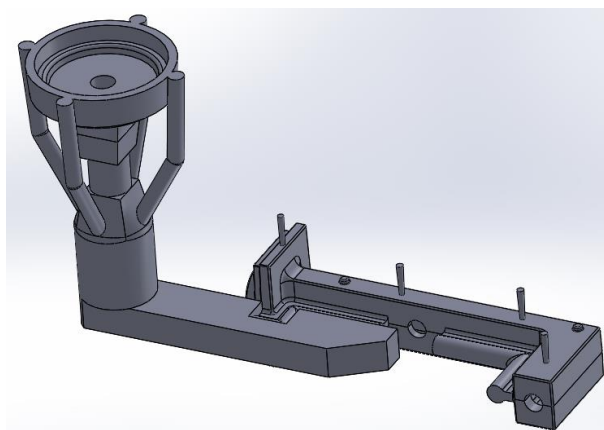


**Figura 65 - Molde de torneira modelado em CAD 3D**



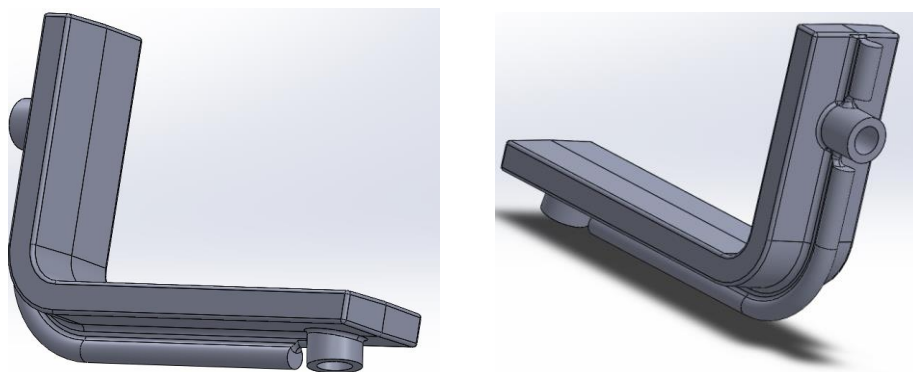
**Figura 66 - Molde do macho modelado em CAD 3D**

- Integração do restante sistema de gitagem, modelado em CAD 3D (fig. 67).



**Figura 67 - Modelo de torneira oca com gitagem completa modelado em CAD 3D**

Finda a modelação CAD 3D do modelo de torneira escolhido e restantes elementos referidos, é apresentada na figura 68, outra torneira modelada e considerada inicialmente para o processo de fabrico. Uma vez que o previsto era produzir apenas um modelo de torneiras, este acabou por ser preterido, por ser mais simples.



**Figura 68 - Torneiras modeladas e consideradas para o processo de fabrico**

### 3.3 Método de conversão indireto

Na parte prática deste trabalho havia interesse em entender, o impacto, sobretudo económico da aplicação de conversão indireta ou direta para a obtenção de uma torneira na liga de latão.

Nesse sentido, este subcapítulo 3.3 abordará os passos para o fabrico do modelo em cera, bem como os restantes até obter o modelo de torneira em latão.

#### 3.3.1 Estereolitografia (SL)

De entre as diferentes soluções existentes para gerar um modelo físico, a estereolitografia foi a escolhida. A precisão dimensional e ótimos acabamentos que este método oferece, fazem dele a solução ideal quando se pretende materializar as peças que servem apoio à construção do molde de injeção de cera, nomeadamente o construído por vazamento, sobre as peças, de uma mistura de resina de poliuretano com partículas de alumínio.

As peças modeladas especificamente para serem impressas em estereolitografia foram exportadas, sob a forma de ficheiro stl, para um *software* dedicado que permite distribuí-las na superfície de trabalho da máquina.

Essa exportação converte a superfície das peças num determinado número de triângulos, sendo esse número dependente da resolução que se pretende. A resolução utilizada seguiu os parâmetros indicados na figura 69.

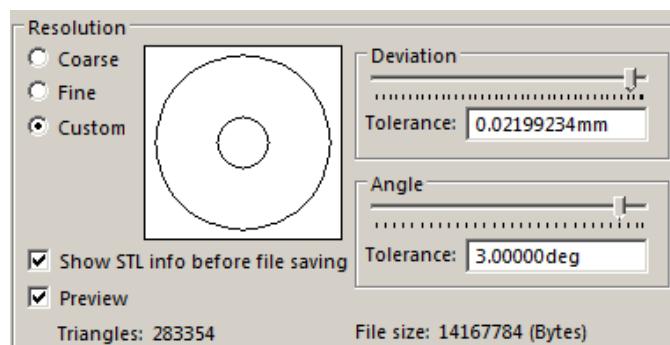


Figura 69 - Parâmetros de exportação do ficheiro de modelação para estereolitografia

Já nesse formato foram consideradas as contrações estimadas para cada etapa do processo (cera e liga de latão), tendo sido dada uma compensação de 2% sob a forma de expansão, equivalente ao estimado.

Já com os parâmetros estabelecidos, deu-se início ao trabalho de impressão, que consistiu na impressão de duas metades da torneira, duas metades do macho e duas metades dos tacos.

Estes elementos foram divididos em metades simétricas uma vez que a posterior construção do molde assim o exige.

A máquina de estereolitografia presente no INEGI e utilizada no trabalho foi o modelo Viper SI2 da 3DSystems (fig. 70).

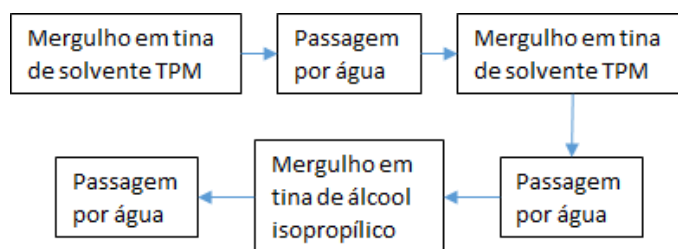




**Figura 70 - Máquina Viper SI2 presente no INEGI**

Os pormenores de funcionamento deste tipo de máquina foram abordados em maior detalhe no capítulo “Geração de modelo Físico” da revisão bibliográfica, e uma ficha com as características deste modelo está presente em anexo.

Quando a máquina acaba de realizar o modelo SL, este está provido de suportes de apoio à materialização do mesmo. Desta forma é necessário proceder à remoção e limpeza da peça, como o procedimento presente na figura 71 indica. Cada etapa dura alguns segundos, sendo o procedimento considerado expedito.



**Figura 71 - Procedimento de limpeza dos modelos SL**

Este procedimento é realizado numa banca apropriada (fig. 72).



**Figura 72 - Banca para limpeza de modelos presente no INEGI**



Concluída a fase de limpeza, as peças seguiram para uma fase de pós-cura para aumentar a resistência mecânica das peças, que consiste na incidência, durante cerca de 30 minutos, de radiação ultravioleta (fig. 73).

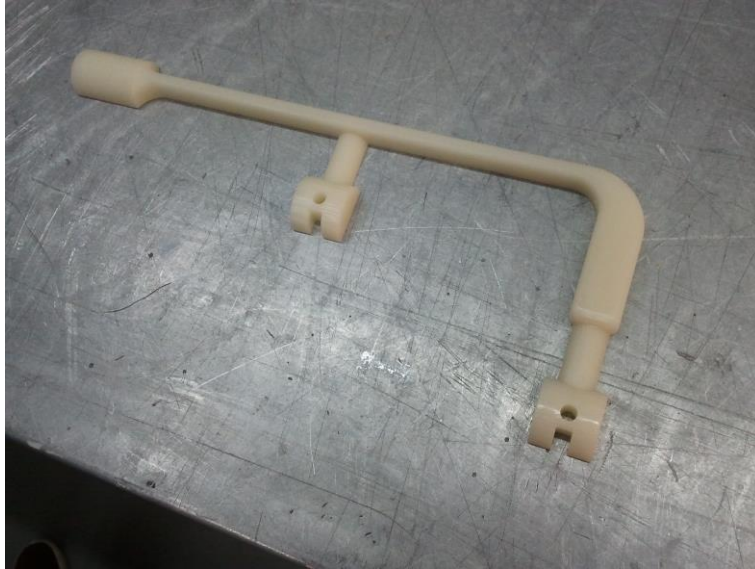


**Figura 73 - Equipamento de pós-cura para peças em estereolitografia, presente no INEGI**

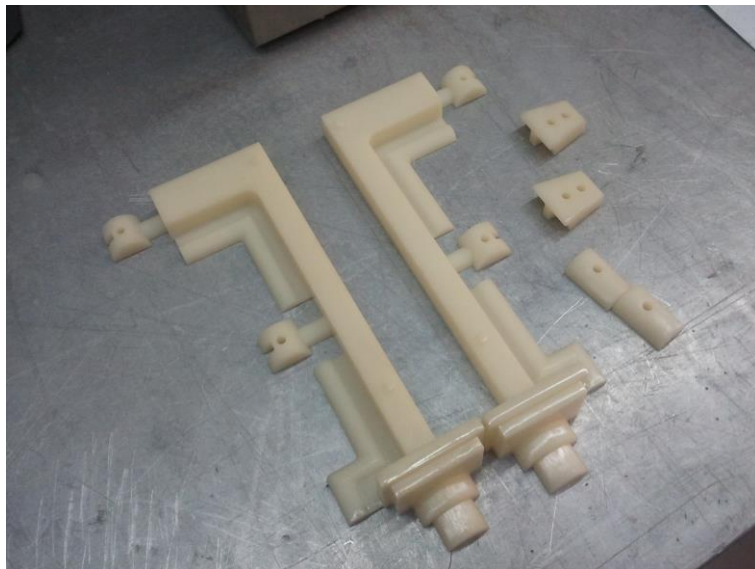
As peças finais, resultantes da impressão que durou cerca de 10h, limpeza e cura, podem ser observadas nas figuras 74 e 75.



**Figura 74 - Modelo em estereolitografia de metade da torneira**



**Figura 75 - Modelo SL de metade do macho**



**Figura 76 - Metades da torneira com tacos**

### **3.3.2 Criação dos moldes de injeção da cera**

Como foi referido na revisão bibliográfica há tipicamente três tipos de moldes que se consideram quando se pretende injetar cera: em silicone, em resina de poliuretano com pós de alumínio ou em alumínio (bloco maquinado).

O tipo de molde escolhido para a injeção de ceras foi o de resina de poliuretano com fina granalha de alumínio. Estes moldes são feitos por vazamento de uma mistura de resina de poliuretano (dividida em duas partes), com granalha de alumínio, numa relação de uma parte de resina, para duas de alumínio. A presença do alumínio na criação deste tipo de molde tem

três justificações principais – diminui os custos de produção (é mais barato que a resina), comporta-se como “carga” impedindo as variações dimensionais da resina quando solidifica e aumenta o coeficiente de transferência de calor diminuindo o tempo necessário para a desmoldação dos modelos injetados.

O tipo de material do molde escolhido é obtido de forma relativamente rápida, quando comparado com o molde maquinado em alumínio e tem uma precisão geometria bastante superior ao molde em silicone que sofre alguma deformação com a injeção. A precisão dimensional e a rápida disponibilidade de obtenção foram os motivos afetos à escolha.



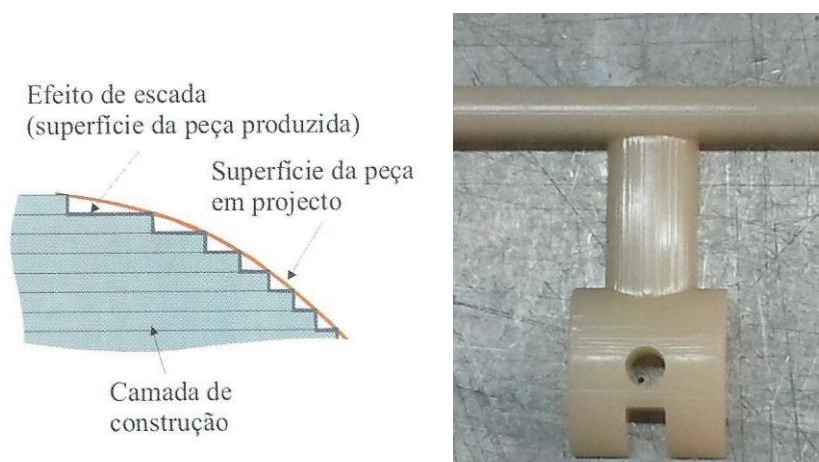
**Figura 77 - Resina Poliuretano e granalha de alumínio utilizadas**

A figura 78 demonstra a execução da mistura dos elementos (resina e granalha de alumínio) com um equipamento auxiliar. Esta fórmula é posteriormente vazada sobre os modelos em estereolitografia e será a composição do molde.



**Figura 78 – Junção e mistura dos elementos constituintes que compõem o futuro molde**

Antes de começar o processo de criação do molde propriamente dito, é necessário efetuar um ligeiro polimento na superfície dos modelos SL, devido ao efeito de escada presente nos mesmos (fig. 79)



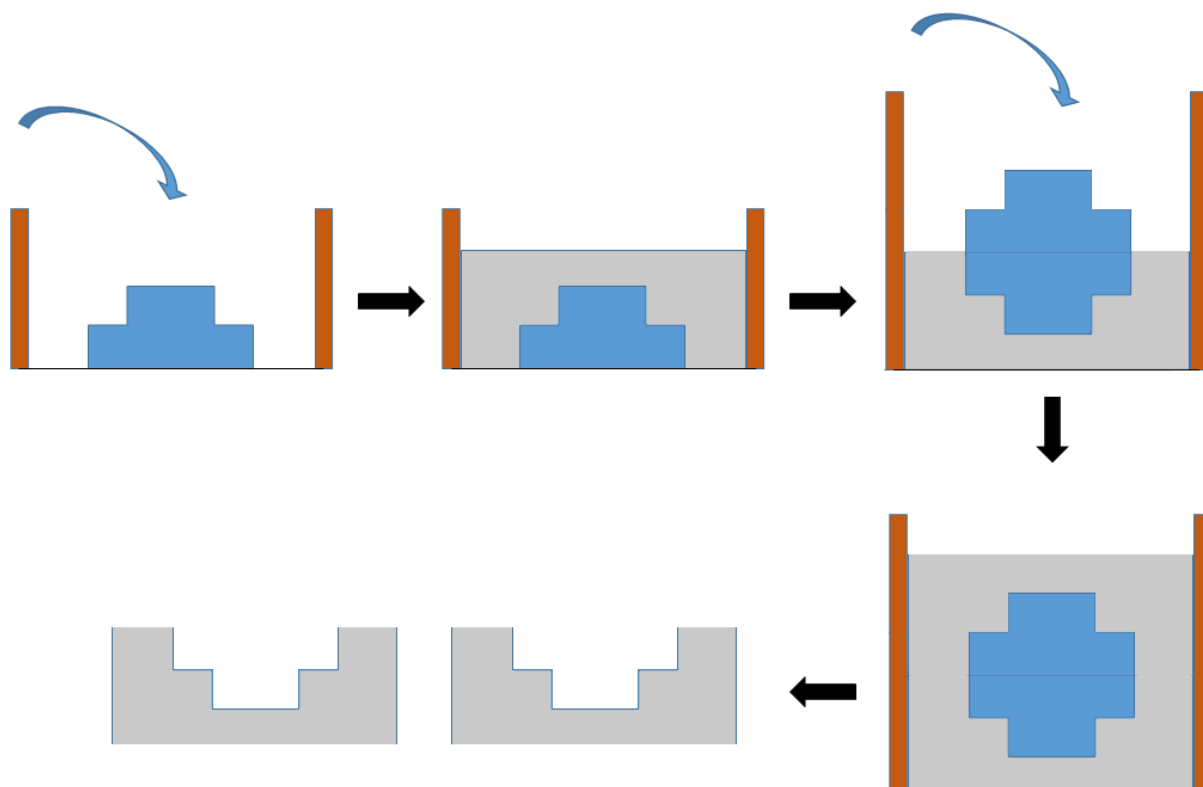
**Figura 79 - Efeito de escada em estereolitografia (Alves 2001) com imagem real**

As lixas utilizadas são de elevada granulometria, sendo o suficiente para remover este indesejável efeito, sem comprometer o detalhe e características geométricas das peças.



**Figura 80 - Polimento dos modelos SL para retirar efeito de escada**

Com os modelos preparados, segue-se o processo de criação do molde propriamente dito. O fabrico deste tipo de molde é feito da forma representada no esquema da figura 81.

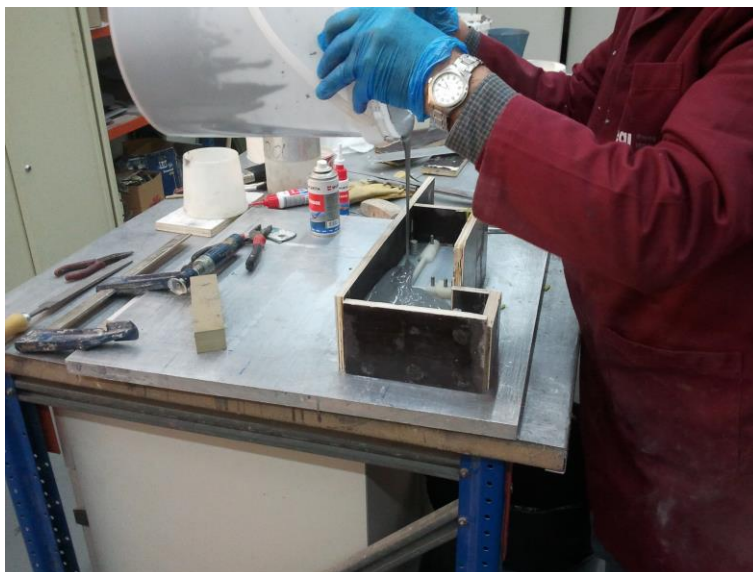


**Figura 81 - Esquema de fabrico de moldes de resina com alumínio, por vazamento**

Metade do modelo que vai dar a forma à cavidade do molde é colocado numa base, sendo contruído um perímetro de madeira, que funciona como caixa ou cofragem, e vai delimitar a forma e dimensão do molde. Nesta fase são colocadas as fêmeas das guias do molde e aplicado desmoldante nas peças. A mistura de resina com granalha de alumínio é então vazada para a caixa. Após secagem de cerca de uma hora, retira-se a meia moldação da caixa de madeira, roda-se a mesma 180°, aplica-se, em simetria, a segunda metade do modelo em SL, colocam-se os machos das guias e aplica-se desmoldante. É criada nova caixa de madeira e vazada de novo a mistura. Após secagem, remove-se a caixa, separam-se as meias moldações e retiram-se os modelos estereolitográficos, sendo reveladas desta forma as cavidades moldantes. Em seguida, através de um furo com dimensões apropriadas, cria-se o canal de injeção de cera, ficando desta forma o molde pronto para ser utilizado.

Na figura 82 é possível observar uma das etapas, nomeadamente a de vazamento da mistura que vai dar origem a segunda parte de moldação do molde do macho.





**Figura 82 - Vazamento da mistura para a criação da moldação do macho**

O resultado final desta etapa de criação dos moldes de injeção de cera correspondem precisamente aos moldes pretendidos:

- Molde da torneira

O molde da torneira finalizado ficou com 283x151\*104 mm de comprimento, largura e altura, respetivamente, com um peso de 7,35 kg.

- Molde do macho

O molde do macho apresentou 300x128\*80 mm de comprimento, largura e altura, respetivamente, com um peso de 4,70 kg.

### **3.3.3 Injeção de cera nos moldes**

Com os moldes de injeção construídos e preparados para ser utilizados, seguiu-se a fase de injeção de cera, cujo objetivo era fabricar os modelos maciços e ocos da torneira em cera que iriam ser utilizados para a construção da carapaça cerâmica.

A injeção foi realizada em duas máquinas de injeção apropriadas – *ProJector Kerr* e *Tatum* –, uma com cera solúvel, outra com cera de modelos, respetivamente.

No caso dos modelos maciços a injeção foi apenas realizada no molde da torneira, preenchendo-o na totalidade com cera de modelo – *Cerita F27-74*.

As características das ceras dos modelos estão descritas na tabela 27. Em anexo encontra-se informação mais detalhada das características das ceras apresentadas.

**Tabela 27 - Características das ceras utilizadas na injeção**

<b>Ceras</b>	<b>Tipo</b>	<b>Temperatura Fusão (°C)</b>	<b>Cor</b>
Sol-U-Carv	Solúvel	58 – 63	Amarela
Cerita F27-74	de Modelo	72,8 – 78,3	Azul

As condições de injeção respeitaram os parâmetros determinados pelo fabricante da cera, e foram realizadas como está descrito na tabela 28.

**Tabela 28 - Condições de injeção das ceras nos moldes**

<b>Ceras</b>	<b>Pressão (bar)</b>	<b>Temperatura Injeção (°C)</b>	<b>Tempo de injeção (s)</b>	<b>Tempo até desmoldação (minutos)</b>
Sol-U-Carv	5	60	20	5
Cerita F27-74	5	69	30	10

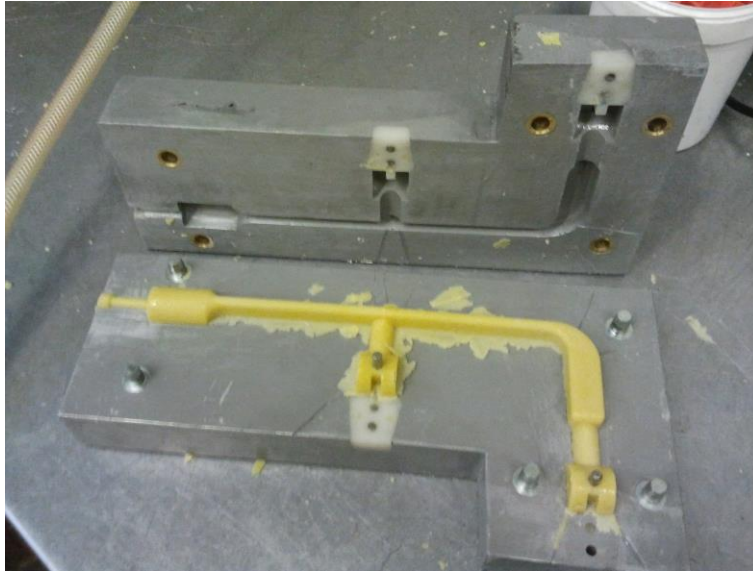
Os valores apresentados garantiram um bom preenchimento dos moldes. Os modelos em cera resultantes da injeção apresentaram uma correta geometria após desmoldação.

O modelo de torneira que se pretendia que fosse oco, seguiu o seguinte procedimento:

- Aplicação de desmoldante (à base de silicone), nas cavidades do molde do macho. Seguiu-se o fecho e aperto com dois grampos do molde e procedeu-se à injeção da cera solúvel *Sol-U-Carv* (fig. 83).

**Figura 83 - Injeção de cera solúvel no molde do macho**

- Após sensivelmente 5 minutos, tempo necessário para que a cera solúvel solidifique, abriu-se o molde do macho e retirou-se o mesmo da cavidade (fig.84). Nesta fase houve alguma dificuldade para retirar o macho, pois a contração da cera foi quase inexistente.



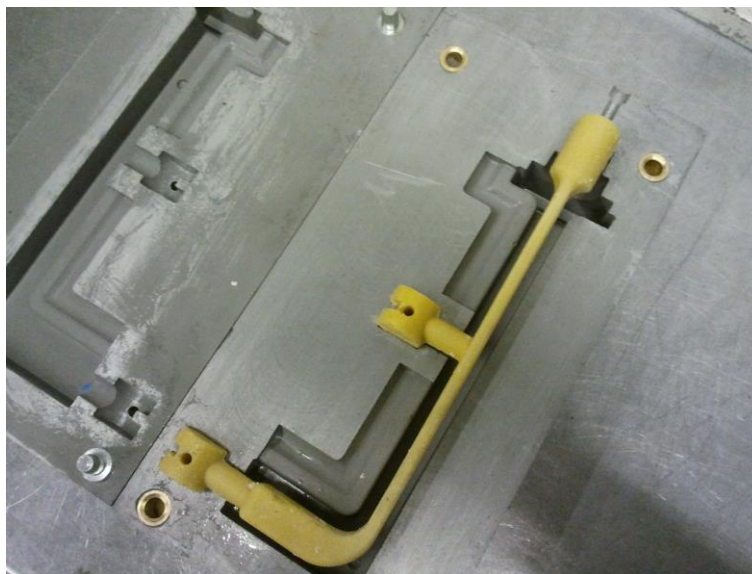
**Figura 84 - Macho solúvel presente na cavidade moldante**

- Colocação do macho numa posição fixa e predefinida, no interior da cavidade do molde da torneira, após aplicação de desmoldante (fig. 85). Fecho do molde, também apertado com auxílio de grampos, e injeção da *Cerita F27-74* (fig. 86).



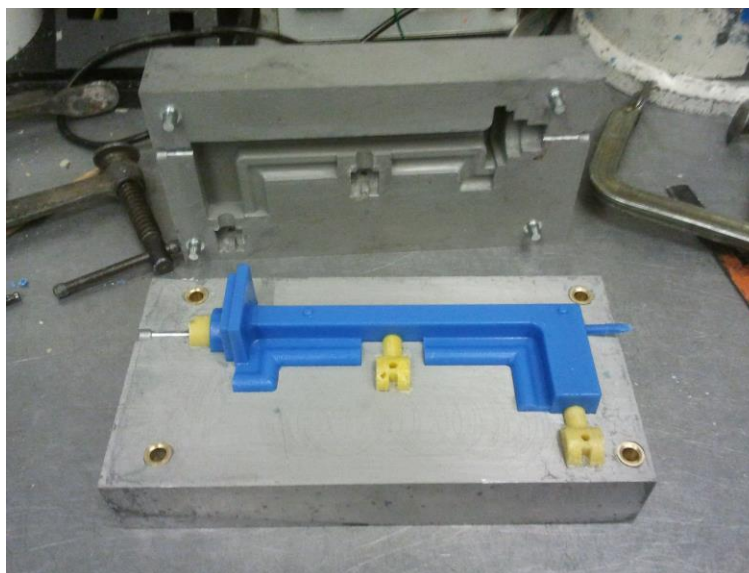
**Figura 85 - Colocação do macho em cera solúvel no molde da torneira**





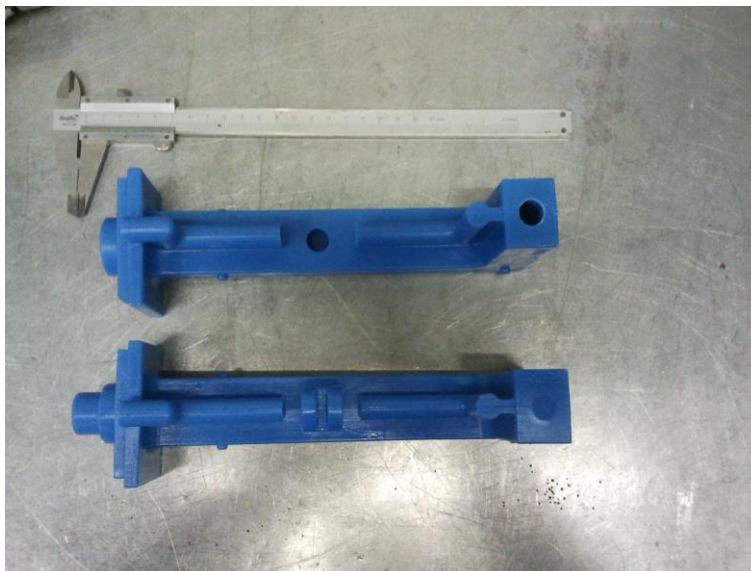
**Figura 86 - Injeção da cera de modelo no molde de injeção de cera da torneira**

- Passados 10 minutos, procedeu-se à desmoldação da torneira de cera ainda com o macho solúvel no seu interior (fig. 87)



**Figura 87 - Modelo em cera da torneira com macho solúvel**

- Colocação do modelo da torneira num recipiente com uma solução aquosa de 15% de ácido clorídrico, para remover o macho solúvel. Neste caso em particular, a torneira esteve imersa na solução de um dia para o outro, mas estima-se que a cera dissolva em poucas horas. Obtenção do modelo de torneira oco, em cera (fig. 88)



**Figura 88 - Modelos em cera: oco em cima e maciço em baixo**

Nesta fase, como referido anteriormente, notou-se uma certa dificuldade de desmoldação do modelo em cera solúvel, do respetivo molde, devido à quase inexistência de contração. Isto deve-se à presença elevada de cargas na composição da cera, que minimizam os efeitos de contração. Recomenda-se, em futuros trabalhos similares, que sejam utilizados ângulos de saída superiores, para os moldes projetados em que a cera a injetar é solúvel.

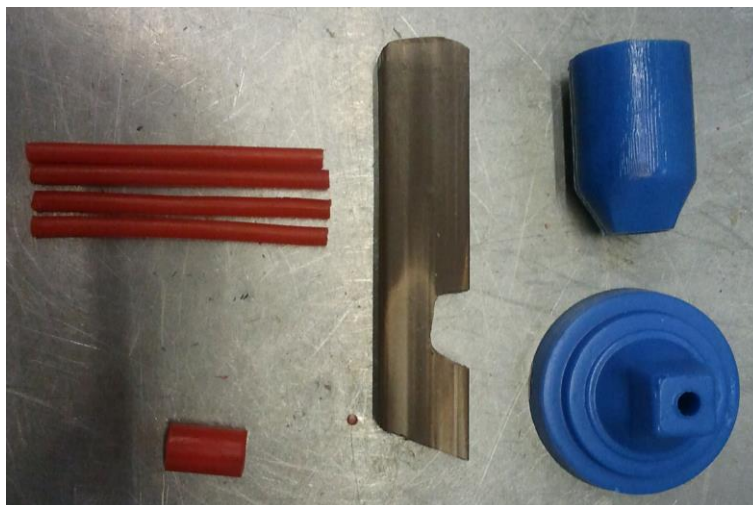
### **3.3.4 Integração de sistema de gitagem**

O sistema de gitagem é composto por todos os elementos que, ligados direta ou indiretamente à peça que vai ser vazada, auxiliam o correto enchimento, com ausência de defeitos. O objetivo do sistema de gitagem é fornecer os canais por onde o metal vazado passa, aquando do vazamento, permitindo que a peça vazada seja preenchida. O sistema de gitagem tem também como objetivo garantir que a peça vazada não apresenta defeitos, como por exemplo rechupes, tentando sempre concentrar em si os eventuais defeitos que ocorram na fundição.

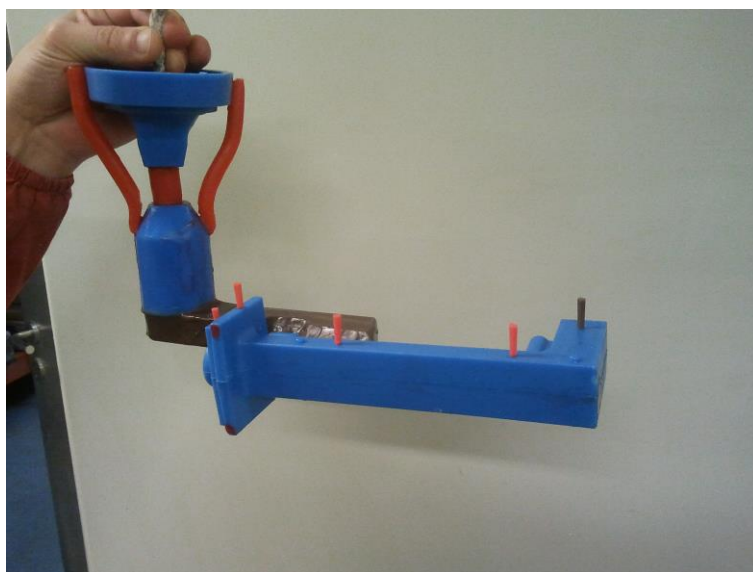
No caso do processo de cera perdida o sistema de gitagem é composto por elementos, também eles compostos em cera, que sirvam a função descrita no parágrafo anterior.

Na modelação CAD 3D foi já possível ter uma noção dos elementos utilizados e que compõem o gitagem do modelo oco. Esses elementos estão expostos separadamente na Figura 89 e integrados num modelo na Figura 90. No modelo maciço há a integração de um elemento

de cera denominado alimentador, com dimensões consideráveis, acoplado numa das pontas do modelo em torneira.



**Figura 89 - Elementos que compõem o sistema de gitagem da torneira oca**



**Figura 90 - Sistema de gitagem integrado num modelo de torneira oca**

A construção destes modelos foi feita com auxílio de cera cola e um ferro de soldar cera.

Uma vez que era relativamente fácil e rápido obter modelos em cera injetados a partir dos machos, foi decidido que seriam construídos e submetidos ao processo fundição, 6 modelos de torneira – 3 modelos ocos e 3 modelos maciços.


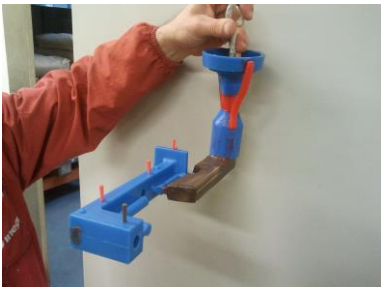




Com esta quantidade disponível de modelos, determinou-se que iriam ser utilizados diferentes restritores, mais concretamente três tipos diferentes, correspondentes a três diâmetros de secção por onde o metal passa logo após a pia de vazamento: um de 10,5 mm, outro de 19,5 mm e outro sem restritor em que as dimensões correspondem a 25 mm.

De forma a identificar os três modelos ocos e três modelos maciços utilizados daqui em diante, optou-se por numerá-los segundo os termos descritos na Tabela 29, sendo expostas as imagens na Tabela 30.

**Tabela 29 - Referências dos modelos injetados em cera com sistema de gitagem**

Modelo nº	Características
1	Cera injetada; Oco; restritor $\varnothing = 10,5$ mm
2	Cera injetada; Oco; restritor $\varnothing = 19,5$ mm
3	Cera injetada; Oco; sem restritor
4	Cera injetada; Maciço; restritor $\varnothing = 10,5$ mm
5	Cera injetada; Maciço; restritor $\varnothing = 19,5$ mm
6	Cera injetada; Maciço; sem restritor

**Tabela 30 - O sistema de gitagem integrado em cada modelo**

<b>Modelo nº</b>	<b>Foto do modelo</b>
1	
2	
3	
4	
5	
6	

### 3.3.5 Carapaças cerâmicas

Integrado o sistema de gitagem nos seis modelos em cera, seguiu-se a fase de construção da carapaça cerâmica, em cada um deles.

A forma e composição das carapaças cerâmicas tem em conta especialmente a liga metálica a ser vazada. Determinados parâmetros tais como a complexidade e espessuras da peça em cera e respetiva gitagem que vão criar a zona de moldação, também podem ter influência na escolha dessa composição. Uma vez que a liga a ser utilizada na fundição era de latão, sendo portanto um material não reativo e com ponto de fusão de 900°C, a composição das barbotinas deveria ser à base de zircão e sílica.

As composições das barbotinas utilizadas no processo estão descritas nas tabelas 31 e 32:

**Tabela 31 - Barbotina utilizada na primeira camada - SZ (INEGI)**

Composição/Proporções		
Constituintes	Composição	Percentagem em peso
Ligante	Levasil 300/30 (Stark), sílica coloidal 30% com latex	18,5
Farinha	Silicato de zircónia ( $ZrSiO_4$ ), (250mesh)	81,5
Molhante	Erkantol	0,05% do ligante
Antiespumante	Baysilone	0,05% do ligante

**Tabela 32 - Barbotina para restantes camadas - SSF (INEGI)**

Composição/Proporções		
Constituintes	Composição	Percentagem em peso
Ligante	Levasil 300/30 (Stark), sílica coloidal 30% com latex	17
Farinha	Sílica fundida ( $SiO_2$ ), (Nin-Sil-fused Sílica 200F da Ninco Inc.)	83
Molhante		--
Antiespumante		--



Se relativamente ao metal que iria ser vazado, o utilizado foi comum aos seis modelos disponíveis – latão da Cifial – a geometria é distinta entre os modelos – ocos ou maciços.

Nesse sentido, os procedimentos sofreram algumas alterações, nomeadamente a inclusão de varetas cerâmicas (fornecidas pela zolern – fig. 91) e uma pasta cerâmica (tab. 33) que preenchesse o volume interior em duas das torneiras ocas. Esta inclusão teve como objetivo reforçar estruturalmente o macho cerâmico, para que resistisse às pressões metalo-estáticas induzidas pelo vazamento. Outra alteração relevante foi a de atribuir a um destes dois modelos ocos, uma segunda camada igual à primeira, ou seja, repetir a primeira camada dada. O outro modelo oco disponível teve o mesmo procedimento das torneiras maciças.



**Figura 91 - Varetas cerâmicas com 4,5 mm de diâmetro de secção fornecidas pela Zolern**

**Tabela 33 - Composição da pasta cerâmica**

<b>Composição</b>	<b>Percentagem [%]</b>
ZrSiO <sub>4</sub> – 250 mesh - Farinha	36
ZrSiO <sub>4</sub> – 100 mesh - Areia	28
AlSi – 0,2-0,5 - Areia	16
Sílica coloidal - Ligante	20
Catalisador	(8% do volume do ligante)

Os procedimentos utilizados na construção das diferentes carapaças cerâmicas podem ver visualizados nas tabelas 34 a 36. Os tempos de secagem estimados divergem substancialmente dos tempos de secagem efetivos. Isto deve-se ao facto de se pretender garantir que, no caso das torneiras maciças, a barbotina presente no interior da torneira em cera, seca convenientemente, uma vez que a convecção forçada não é muito efetiva nesta zona específica.

Data	Tempo secagem estimada (h)	Hora Início	Hora Fim	Barbotina	Areia	Visc. (s)	pH	Densi.	Tempo Imersão (s)
1-4-14	2,5	11h:20	11h:55	SZ	Zirção 100 mesh	13,52	7,5	2,74	30
1-4-14	2	16h:30	16h:37	SSF	AlSi 0,2-0,5	9,66	9	1,61	60
3-4-14	0,16	-	-	Varetas + Pasta	-	-	-	-	-
3-4-14	2	14h:15	14:40	SSF	AlSi 0,2-0,5	9,75	9	1,61	60
4-4-14	2	10h:30	11h:00	SSF	AlSi 0,5-1	10,31	9	1,61	60
4-4-14	2	15h:12	15h:30	SSF	AlSi 0,5-1	10,31	9	1,61	60
4-4-14	2	17h:30	17h:40	SSF	AlSi 0,5-1	10,31	9	1,61	60
5-4-14	2	12h30	13h30	SSF	AlSi 0,5-1	9-10	9	1,61	60
5-4-14	12	14h:47	15h:00	SSF	Banho	9-10	9	1,61	60

#### Carapaça do modelo nº 1

**Tabela 34 - Procedimento de criação das camadas cerâmicas para o modelo nº 1**



Carapaça do modelo nº 2**Tabela 35 - Procedimento de criação das camadas cerâmicas para o modelo nº 2**

Data	Tempo secagem estimada (h)	Hora Início	Hora Fim	Barbotina	Areia	Visc (s).	pH	Densi.	Tempo Imersão (s)
1-4-14	2,5	11h:20	11h:55	SZ	Zirção100 mesh	13,52	7,5	2,74	30
1-4-14	2	16h:30	16h:37	SZ	Zirção100 mesh	11	7,5	2,74	30
3-4-14	0,16	-	-	Varetas + Pasta	-	-	-	-	-
3-4-14	2	14h:15	14:40	SSF	AlSi 0,2-0,5	9,75	9	1,61	60
4-4-14	2	10h:30	11h:00	SSF	AlSi 0,5-1	10,31	9	1,61	60
4-4-14	2	15h:12	15h:30	SSF	AlSi 0,5-1	10,31	9	1,61	60
4-4-14	2	17h:30	17h:40	SSF	AlSi 0,5-1	10,31	9	1,61	60
5-4-14	2	12h30	13h30	SSF	AlSi 0,5-1	9-10	9	1,61	60
5-4-14	12	14h:47	15h:00	SSF	Banho	9-10	9	1,61	60

Carapaças dos modelos nº 3, 4, 5 e 6**Tabela 36 - Procedimento de criação das camadas cerâmicas para os modelos nº 3, 4, 5 e 6**

Data	Tempo secagem estimada (h)	Hora Início	Hora Fim	Barbotina	Areia	Visc. (s)	pH	Densi.	Tempo Imersão (s)
1-4-14	2,5	11h:20	11h:55	SZ	Zirção100 mesh	13,52	7,5	2,74	30
1-4-14	2	16h:30	16h:37	SSF	AlSi 0,2-0,5	9,66	9	1,61	60
3-4-14	2	14h:15	14:40	SSF	AlSi 0,2-0,5	9,75	9	1,61	60
4-4-14	2	10h:30	11h:00	SSF	AlSi 0,5-1	10,31	9	1,61	60
4-4-14	2	15h:12	15h:30	SSF	AlSi 0,5-1	10,31	9	1,61	60
4-4-14	2	17h:30	17h:40	SSF	AlSi 0,5-1	10,31	9	1,61	60
5-4-14	2	12h30	13h30	SSF	AlSi 0,5-1	9-10	9	1,61	60
5-4-14	12	14h:47	15h:00	SSF	Banho	9-10	9	1,61	60

Antes do início da aplicação da primeira camada o modelo em cera, juntamente com o restante sistema de gitagem, é mergulhado numa solução denominada trisol (fig. 92). Esta imersão permite atacar a cera de forma controlada e, desta forma, retirar resíduos de cera ou sujidade, promovendo uma boa adesão da barbotina.



**Figura 92 - Imersão de modelo em trisol**

Após este passo, os modelos estavam prontos para receber a primeira camada.

À semelhança do que ocorre nas posteriores camadas, o modelo é mergulhado entre 30 a 60 segundos numa tina que contém barbotina (fig. 93), que está em constante movimento para que as partículas refratárias não assentem, e deixado a escorrer após a imersão. De seguida o modelo é polvilhado com material refratário com granulometria definida (fig. 94), dependendo da camada que se esteja a considerar.



**Figura 93 - Imersão de modelo na primeira camada de barbotina**



**Figura 94 - Polvilhamento de material refratário sobre a primeira camada de barbotina**

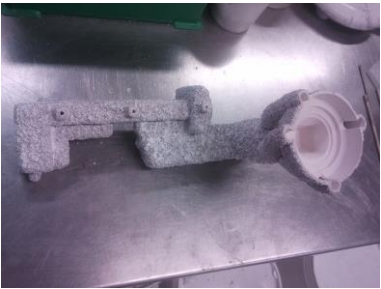

Segue-se um período de secagem da primeira camada, em convecção forçada (ventoinhas). Entre a primeira e a segunda camada não se deve exceder as 2h30 definidas no tempo secagem, sob pena da primeira camada se tornar extremamente quebradiça.



**Figura 95 - Secagem da primeira camada**

Seguidos os procedimentos, definidos previamente, obtiveram-se cinco carapaças cerâmicas aptas (uma delas reparada) para o processo seguinte, tendo sido uma dela danificada e irrecuperável.

**Tabela 37 - Carapaças construídas (imagens respeitantes após descrificação)**

<b>Modelo nº</b>	<b>Foto da carapaça</b>
1	
2	
3	
4	
5	<p>Modelo cedeu durante a criação da carapaça, tornando-se irrecuperável.</p> <p>Uma vez que era um modelo maciço, foi determinado não refazer o processo para este caso.</p>
6	

### 3.3.6 Descerificação e sinterização

Como foi referido na revisão bibliográfica há duas possibilidades de descerificar uma carapaça cerâmica: por choque térmico ou em autoclave.

No INEGI o procedimento utilizado é o choque térmico, sendo este feito no forno que está na figura 96.



**Figura 96 - Forno do INEGI utilizado na descerificação e sinterização de carapaças cerâmicas**

Este método começa quando gacho que auxilia o manuseamento do modelo em cera para a criação das camadas cerâmicas e suporta a carapaça é retirado e as superfícies cerâmicas presente pia de vazamento bem como nos ventos são removidas, para que a cera tenha saída aquando do processo de descerificação (fig.97).



**Figura 97 - Remoção do gacho e corte com serra das superfícies cerâmicas da pia de vazamento e ventos**



Por medida de precaução, devido à expansão da cera presente na carapaça cerâmica, são por vezes efetuados furos na zona de gitagem da carapaça, para garantir que a cera pode escapar-se rapidamente, quando ocorrer a descerificação.

Uma vez que a sinterização é feita a 1000°C e é um passo indispensável não só para remover eventuais impurezas (matéria orgânica e resquícios de cera) e humidades, como para reforçar estruturalmente a carapaça, optou-se por descerificar e sinterizar ao mesmo tempo. O tempo despendido para o efeito foi cerca de 2 horas. Na figura 98 é possível observar o aspeto do forno e carapaças no fim do estágio.



**Figura 98 - Peças após processo de descerificação e sinterização**

### **3.3.7 Vazamento da Liga**

O vazamento da liga de latão compreende alguns procedimentos a ter em conta:

- Pré-aquecimento das carapaças cerâmicas a 700°C durante 1 hora, num forno específico (fig. 99), para melhorar a vazabilidade do processo de fundição (garantir o preenchimento da carapaça)



**Figura 99 - Forno utilizado no pré-aquecimento das carapaças cerâmicas**

- Colocação de lingotes ou restos de liga de latão da Cifial no cadinho, que por sua vez é colocado no forno de indução do INEGI (fig.100)



**Figura 100 - Forno de indução do INEGI**

- Vazamento da liga nas carapaças cerâmicas, a uma temperatura aproximada entre 950 e 980°C (controlada por termopar)



**Figura 101 - Vazamento da liga de latão da Cifial nas carapaças cerâmicas**

As condições de vazamento das cinco carapaças cerâmicas, podem ser consultadas na tabela 38. As temperaturas de vazamento foram ligeiramente superiores para as torneiras ocas, uma vez que as espessuras internas da cavidade moldante eram inferiores, pela existência de um macho.

**Tabela 38 - Condições de vazamento das carapaças referentes aos modelos injetados**

<b>Ordem de vazamento</b>	<b>Referência</b>	<b>Tipo</b>	<b>Temperatura de pré-aquecimento</b>	<b>Temperatura de vazamento</b>
1º	Carapaça do modelo nº2	Oca	700°C	983°C
2º	Carapaça do modelo nº4	Maciça	700°C	970°C
3º	Carapaça do modelo nº1	Oca	700°C	982°C
4º	Carapaça do modelo nº6	Maciça	700°C	970°C
5º	Carapaça do modelo nº3	Oca	700°C	980°C

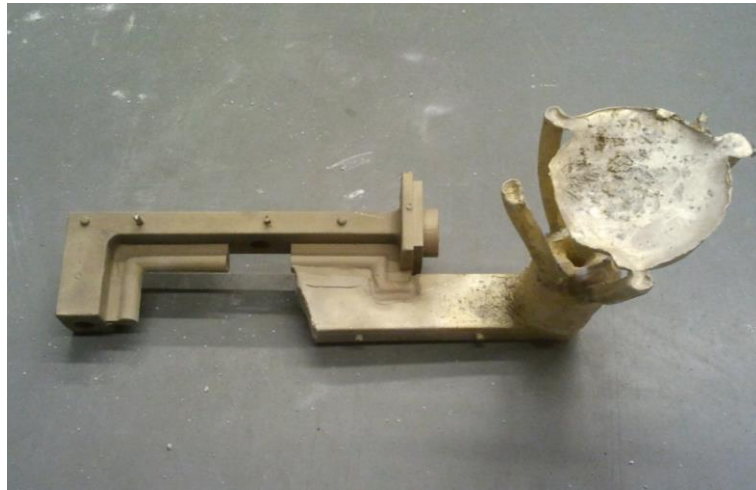
Das cinco carapaças que iniciaram o processo de fundição, quatro correram sem percalços e uma, a do modelo nº 6, falhou aquando do vazamento, por quebra da carapaça numa zona de ligação a um alimentador (fig. 102).

**Figura 102 - Quebra da carapaça cerâmica nº 6 na zona do alimentador**

Relativamente às quatro carapaças que resistiram, foram deixadas em repouso e passado sensivelmente uma hora foram destruídas de forma a revelar a peça fundida.





A remoção da carapaça foi feita de forma manual, com auxílio de um martelo, sendo que, após remoção da maioria, foi utilizada a granalhadora do INEGI. O resultado desta limpeza por projeção de areia na peça vazada, originou resultados, como os demonstrados na figura 103.





**Figura 103 - Resultados da fundição e posterior limpeza do modelo nº1**

**Tabela 39 - Peças vazadas após granalhagem**

<b>Modelo n°</b>	<b>Foto da peça vazada</b>
1	
2	
3	
4	

A granalhagem retirou completamente toda a casca cerâmica presente na superfície do modelo, no entanto nos modelos ocos, este tipo de limpeza não se revelou suficiente. Como tal os três modelos ocos foram mergulhados em soda cáustica a 500°C durante 2 horas, na Zollern.

Foi também efetuada a remoção dos sistemas de gragem, através da utilização de uma serra.

As torneiras ocas ficaram com um ligeiro escurecimento na tonalidade, provocado pela imersão na soda cáustica (fig. 104), sendo perfeitamente reversível através de nova ronda de granalhagem.



**Figura 104 - Torneira nº 1 após remoção do macho cerâmico e corte do sistema de gitagem**

### 3.4 Método direto

O segundo método utilizado para produzir os modelos em cera foi a impressão 3D de cera.

Contrastando com os métodos indiretos que envolvem a criação de moldes e injeção de ceras nos mesmos, os métodos diretos, tais como o aplicado neste trabalho prático, permitem obter diretamente o modelo perdido, utilizado no processo de fundição.

Para este método foi utilizada a mesma torneira, que no método indireto que aparece modelada no capítulo modelação CAD 3D.

Nesta fase optou-se por criar apenas modelos ocos, uma vez que modelos maciços já tinham sido realizados no método indireto e é o tipo de modelo oco que colhe mais interesse de ser fabricado, uma vez que é bastante mais exigente e aproximado do modelo real.

#### 3.4.1 Impressão de cera

O procedimento para a impressão de cera, utilizou o ficheiro da torneira modelada em CAD 3D (fig. 105)

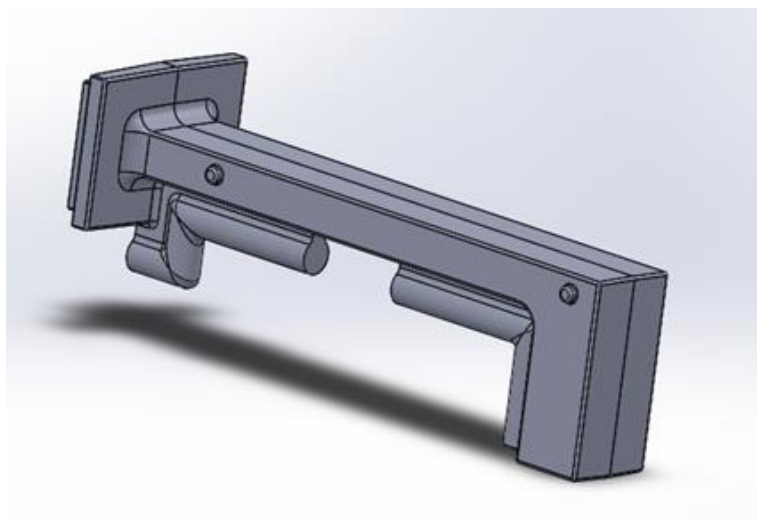


Figura 105 - Modelo CAD 3D da torneira utilizado para a impressão de cera

À semelhança do que aconteceu no caso da estereolitografia, também neste caso foi exportado um ficheiro stl, utilizando a mesma resolução usada pelo método referido (fig. 106).

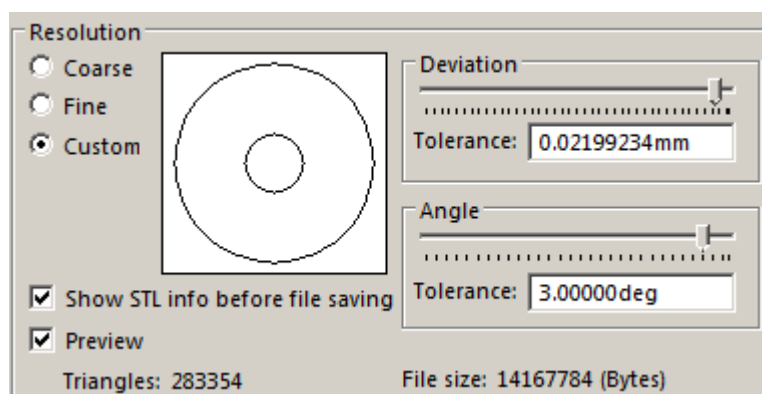


Figura 106 - Parâmetros de exportação do ficheiro modelado para a impressão de cera

À torneira correspondente ao ficheiro exportado, foram compensadas as contrações esperadas do processo de fabrico em 2,3%.

A máquina utilizada para impressão do modelo em cera foi o modelo ProJet 3510 CP da 3DSystems (fig. 107), equipamento esse que estava recentemente disponível nas instalações do INEGI.

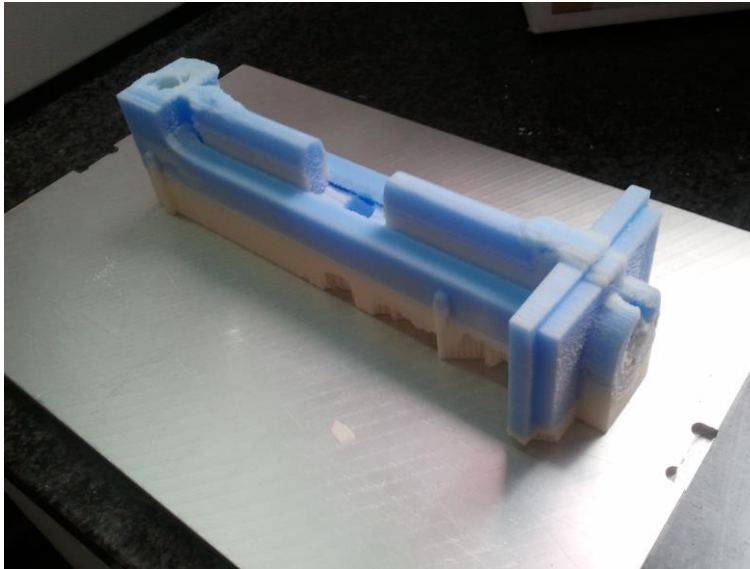


**Figura 107 – Impressora tridimensional de cera ProJet 3510 CP**

O ficheiro foi interpretado pelo *software* dedicado da máquina de impressão e a peça foi posicionada virtualmente na área de trabalho, tendo sido dado um tempo estimado de 25 horas de impressão. Embora seja um tempo de impressão relativamente longo, o método de conversão direta é bastante mais expedito do que o método de conversão indireta, uma vez que este último envolve a realização de mais etapas no seu procedimento.

À semelhança do que acontece na estereolitografia, a máquina introduz automaticamente os suportes necessários, neste caso em cera solúvel, para a correta impressão de cavidades e/ou zonas cuja impressão seja impossível sem os mesmos.

Sendo um equipamento relativamente novo, existiram algumas dificuldades na impressão (fig. 108), tendo sido possível imprimir com sucesso dois exemplares.



**Figura 108 - Modelo impresso em cera com defeito de impressão, ainda com suportes (material branco)**

Os dois exemplares obtidos e já limpos de suportes solúveis (limpos da mesma forma que a cera solúvel), sendo possível observar um dos exemplares na figura 109.

As características deste tipo de ceras estão descritas na seção de geração de modelo físico da revisão bibliográfica.

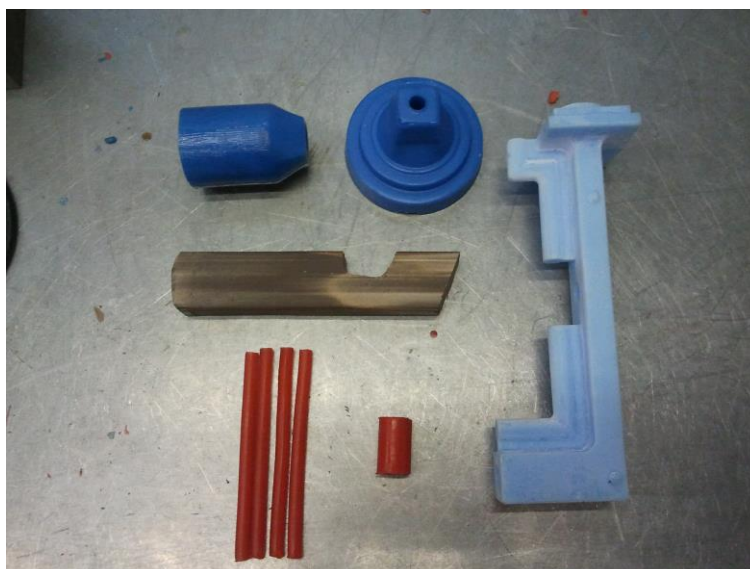


**Figura 109 - Modelo impresso em cera da torneira pretendida**

### 3.4.2 Integração de sistema de gitagem

O sistema de gitagem integrado nos modelos das torneiras impressas em cera foi idêntico ao utilizado nos modelos de cera injetada. O facto de ter sido um sistema que apresentou bons resultados no vazamento efetuado nas carapaças obtidas no método indireto, contribuiu para esta decisão.

Assim, na figura 110 são mostrados os elementos que compõem o sistema de gitagem.



**Figura 110 - Sistema de gitagem aplicado aos modelos impressos**

Dispondo de duas torneiras para o efeito, escolheu-se aplicar um restritor de 10,5 mm e outro de 19,5 mm em cada um dos sistemas de gitagem.

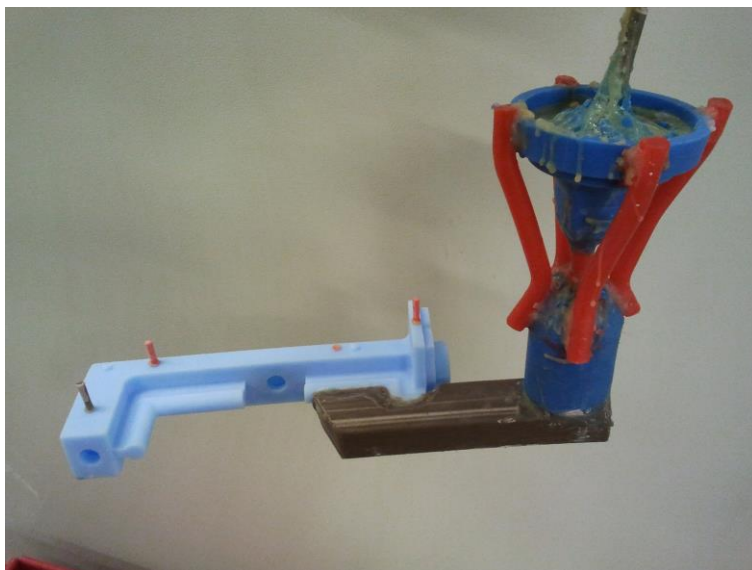
De forma a distinguir desde já um modelo do outro, foram criadas referências que os identifiquem e diferenciem dos modelos obtidos por injeção de cera.

**Tabela 40- Referências dos modelos impressos em cera com sistema de gitagem**

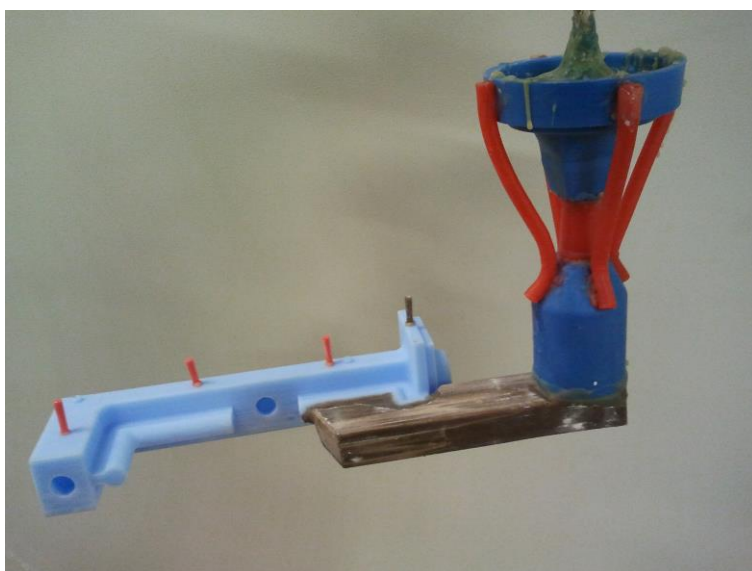
Referência: Modelo nº	Características
7	Cera impressa; Oco; restritor $\varnothing = 10,5$ mm
8	Cera impressa; Oco; restritor $\varnothing = 19,5$ mm

O resultado final da integração dos sistemas de gitagem pode ser visualizado nas figuras 111 e 112.





**Figura 111 - Sistema de gitagem integrado no modelo nº 7**



**Figura 112 - Sistema de gitagem integrado no modelo nº 8**

### **3.4.3 Carapaças cerâmicas**

O próximo passo no processo trata-se da construção das carapaças cerâmicas.

A composição das camadas atribuídas foi semelhante à utilizada na construção das carapaças para modelos de cera injetada, uma vez que as condições de fundição (temperatura e tipo de liga) eram iguais.

Os procedimentos utilizados na construção das duas carapaças cerâmicas podem ver visualizados na tabela 41.

O modelo nº8 teve a aplicação de varetas cerâmicas, misturadas com a pasta cerâmica (fig 113), antes da aplicação da 3ª camada num processo idêntico ao realizado anteriormente.



**Tabela 41 - Procedimento de criação das camadas cerâmicas para os modelos nº 7 e 8**

Data	Tempo secagem [h]	Hora Início	Hora Fim	Barbotina	Areia	Visc.*	pH*	Densi.	Tempo Imersão [s]
6-6-14	2h:30	16h:45	17h:00	SZ	Zirção 100 mesh	16,19	7,5	2,74	30
6-6-14	2h	19h:35	19h:50	SSF	AlSi 0,2-0,5	13,28	9	1,61	60
9-6-14	2h	9h:30	10h:45	SSF	AlSi 0,2-0,5	8,37	9	1,61	60
9-6-14	2h	13h:00	13h:15	SSF	AlSi 0,5-1	9,43	9	1,61	60
9-6-14	2h	15h:20	15h:35	SSF	AlSi 0,5-1	10,43	9	1,61	60
9-6-14	2h	17h:40	17h:47	SSF	AlSi 0,5-1	12,12	9	1,61	60
9-6-14	2h	19h:50	20h:00	SSF	AlSi 0,5-1	8,32	9	1,61	60
9-6-14	12h	22h:00	22h:05	SSF	Banho	7,75	9	1,61	60

**Figura 113 - Preparação para a colocação das varetas e pasta cerâmica na carapaça do modelo nº 8**

As varetas foram inseridas em cada orifício da torneira. A pasta cerâmica foi preparada e tapando dois orifícios sendo, um terceiro enchido o máximo possível.

Após criação e secagem das oito camadas aplicadas nas duas carapaças cerâmicas, o aspeto final, antes da descerificação e sinterização foi o apresentado na figura 114.



**Figura 114 - Aspeto final da carapaça do modelo nº7 após aplicação das oito camadas cerâmicas**

#### **3.4.4 Descerificação e sinterização**

As condições de descerificação e sinterização das carapaças criadas através de modelos impressos em cera foram idênticas às das carapaças criadas através de modelos injetados. As condições podem ser consultadas no subcapítulo correspondente.

#### **3.4.5 Vazamento da Liga**

As carapaças foram pré-aquecidas a 700°C durante 1 hora, antes de lhes ser vazado o latão da Cifial. O latão, composto essencialmente por elementos reciclados, foi fundido até temperaturas a rondar os 980°C (fig. 115)



**Figura 115 – Latão, contido no cadinho, a ser fundido no forno de indução do INEGI**

**Tabela 42- Condições de vazamento das carapaças referentes aos modelos impressos**

<b>Ordem de vazamento</b>	<b>Referência</b>	<b>Tipo</b>	<b>Temperatura de pré-aquecimento</b>	<b>Temperatura de vazamento</b>
1º	Carapaça do modelo nº7	Oca	700°C	950°C
2º	Carapaça do modelo nº8	Maciça	700°C	970°C

Concluído o vazamento, seguiu-se um período de cerca de 1 hora até poder remover a carapaça cerâmica. Após remoção e granalhagem das peças, as torneiras resultantes do processo de fundição apresentaram-se como as figuras 116 e 117 demonstram.

**Figura 116 - Resultados da fundição e posterior limpeza do modelo nº7****Figura 117 - Resultados da fundição e posterior limpeza do modelo nº8**



## 4 Apresentação e análise dos resultados

Como é possível verificar após leitura do relatório, mais concretamente, da parte prática, obtiveram-se um total de seis peças vazadas, passíveis de serem analisadas.

Essa análise e discussão dos resultados do trabalho experimental, seguem três tipos de análise que determina a qualidade das peças fundidas:

- Identificação de defeitos presentes nas peças vazadas

Com auxílio do capítulo “defeitos de fundição associados ao processo de cera perdida” presente na revisão bibliográfica, são identificados eventuais defeitos, as causas para o seu surgimento e propostas soluções para os minorar ou eliminar. O modo de deteção empregue é a inspeção visual das peças vazadas.

- Verificação das contrações das peças vazadas

Dadas as estimativas iniciais de contração para a globalidade do processo de fabrico das torneiras em latão, comparam-se as medidas dos ficheiros modelados com as medições efetuadas nas peças vazadas. Através do conhecimento das contrações, sabe-se se as estimativas iniciais e respetivas compensações dadas estava acertadas.

- Análise de custos inerentes ao processo de fabrico de modelos em cera injetados vs impressos.

Um dos objetivos do trabalho era conhecer qual o método mais apropriado de fabrico do modelo em cera, a ser utilizado no processo de fundição de cera perdida, consoante o número de modelos que se pretende obter. Analisando os custos de cada um dos métodos de conversão utilizados é efetuada uma estimativa de custos e identificado o número a partir do qual compensa utilizar um método em vez do outro.

### 4.1 Análise de defeitos de fundição nas peças vazadas

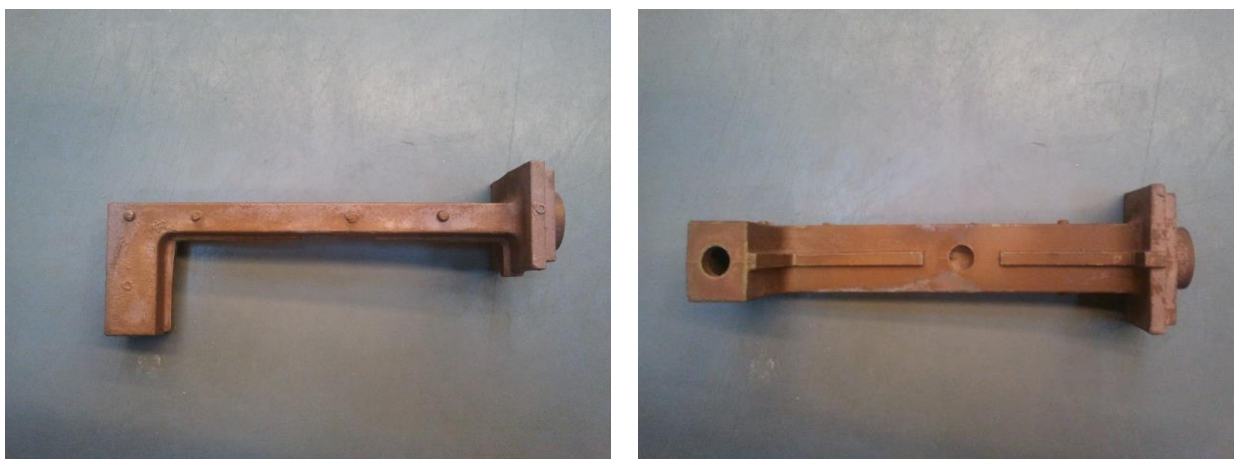
Na generalidade é possível considerar que as peças fundidas obtidas através da aplicação do método de conversão indireto demonstraram ter menos defeitos do que as peças obtidas através da aplicação do método de conversão direto.

#### 4.1.1 Peças vazadas provenientes da aplicação do método de conversão indireto

##### Modelo nº1

No modelo nº1 o volume interior, onde se encontrava o macho, resistiu ao processo de vazamento e garantiu o volume oco interior que se pretendia.

Relativamente a defeitos, é uma peça em que não são notados defeitos evidentes (fig. 118)



**Figura 118 – Fotos de peça vazada nº1 após corte de gito**

##### Modelo nº2

O modelo nº2 apresentou, os defeitos descritos na tabela 43 e observados na figura 119.

**Tabela 43 - Defeitos detetados na torneira com o modelo nº2**

<b>Defeito</b>	<b>Causa</b>	<b>Solução</b>
Escória	Partículas refratárias (óxido de zinco) presentes no cadinho que se deslocaram para o interior da carapaça cerâmica	Garantir que o forno e o cadinho não têm partículas refratárias (óxidos) soltas e proceder à limpeza antes do vazamento





**Figura 119 - Fotos de peça vazada nº2 e seus defeitos**

### Modelo nº3

Esta peça teve apenas a registar a presença de alguma escória que provocou o efeito demonstrado na figura 120.



**Figura 120 - Defeito presente na peça nº3 provocado pela presença de escória**

### Modelo nº4

O modelo nº4 que corresponde a uma peça maciça não apresentou defeitos assinaláveis à exceção do assinalado na figura 121, que corresponde a um ligeiro abatimento da camada primária da carapaça.

**Tabela 44 - Defeitos detetados na torneira com o modelo nº4**

<b>Defeito</b>	<b>Causa provável</b>	<b>Solução</b>
Abatimento da camada primária da carapaça	Fissuração da primeira camada, permitindo que a barbotina penetre entre o modelo em cera e as camadas	Assegurar que o modelo em cera está bem lavado e que a camada primária tem boas propriedades molhante



**Figura 121 - Modelo nº4 e respetivo defeito**

#### **4.1.2 Peças vazadas provenientes da aplicação do método de conversão direto**

### Modelos nº 7 e 8

Tanto o modelo nº7 como o modelo nº8 não garantiram a integridade do volume oco no interior da peça vazada, estando parcialmente preenchidos por metal fundido.

Os procedimentos seguidos para a obtenção deste tipo de peças fundidas, cuja carapaça foi obtida através dos modelos de cera impressos, tiveram tempos de secagem mais curtos. Esta



poderá ser uma das justificações, para o facto do volume interior estar parcialmente preenchido.

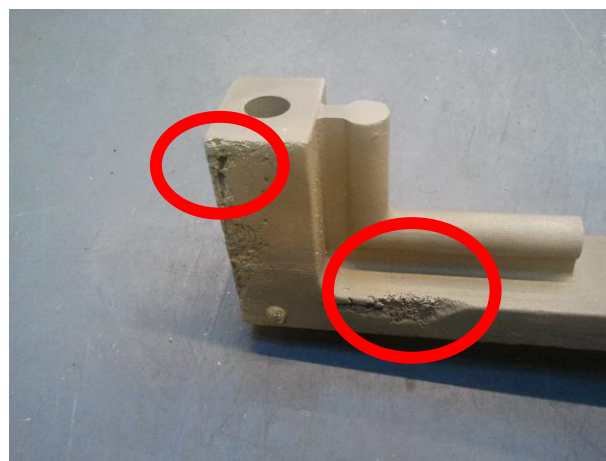
Adicionalmente a peça nº8 demonstrou fraca adesão das camadas cerâmicas iniciais.

**Tabela 45 - Defeitos detetados nas torneiras com o modelo nº7 e 8**

Defeito	Causa provável	Solução
Excessivo metal devido à falha da carapaça	Espessura insuficiente da carapaça; características não controladas nos elementos que compõem o molde	Controlar e corrigir as características dos elementos que compõem o molde



**Figura 122 - Peça nº7 como material vazado na zona oca**



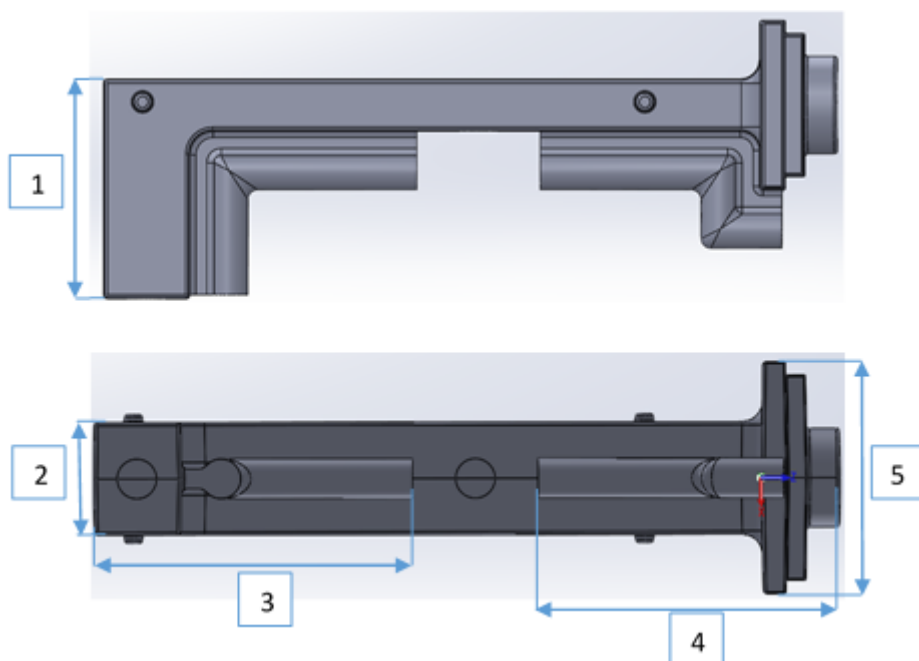
**Figura 123 - Defeitos presentes na peça nº8 provocado pela falha da carapaça**

## 4.2 Análise das contrações das peças vazadas

Durante o procedimento, logo após a modelação CAD 3D do modelo, foram definidas duas compensações de contração distintas para cada um dos métodos – indireto ou direto.

No caso do método de conversão indireto (o primeiro a ser realizado) a compensação atribuída foi de 2%. Para o método direto a compensação foi de 2,3%.

Com a fundição das peças concluída é possível comparar o efeito total da contração resultante do processo, com o inicialmente atribuído. Para o efeito foram definidas cinco cotas de referência a analisar, distribuídas na peça da forma indicada pela figura 124.



**Figura 124 - Referências das cotas escolhidas para avaliar a contração das peças vazadas**

Na tabela 46 está a informação relativa à dimensão das cotas, retiradas do modelo CAD.

**Tabela 46 - Cotas de referência do modelo CAD da torneira**

Referência de Cota	Dimensões (mm)
1	67,50
2	34,00
3	96,50
4	91,50
5	70,00

O cálculo das contrações é definido pela fórmula (3). O valor CAD é o retirado do modelo virtual modelado e o “Real” medido com um paquímetro na correspondente cota da peça.

$$\text{Contração} = \frac{\text{CAD} - \text{Real}}{\text{CAD}} \times 100\% \quad (3)$$

Quando o valor apresentado é negativo, o significado é que, na realidade, a peça apresenta uma dilatação relativamente a essa cota.

#### 4.2.1 Contrações nas peças fundidas resultantes de modelos em cera injetados (método indireto)

Neste método foram geradas dois tipos de torneiras – ocas e maciças.

É desde logo expectável que a contração seja maior em modelos maciços, visto que possuem maior volume de material, estando portanto mais sujeitos a essa redução dimensional. Como é possível observar comparando os valores das tabelas foi precisamente o que aconteceu na realidade.

As contrações das peças maciças estão contabilizadas na Tabela 47

**Tabela 47 - Contrações da torneira maciça obtida através do modelo em cera injetada**

<b>Referência de Cota</b>	<b>Dimensões CAD [mm]</b>	<b>Dimensões Reais [mm]</b>	<b>Contração [%]</b>
1	67,50	66,20	1,93
2	34,00	33,03	2,85
3	96,50	95,62	0,91
4	91,50	90,45	1,15
5	70,00	69,47	0,27

A média de cada cota analisada das três torneiras ocas estão registadas na tabela 48.

**Tabela 48 – Contrações médias das torneiras ocas obtidas através dos modelos em cera injetada**

<b>Referência de Cota</b>	<b>Dimensões CAD [mm]</b>	<b>Dimensões Reais [mm]</b>	<b>Contração [%]</b>
1	67,50	68,00	- 0,74
2	34,00	34,05	- 0,04
3	96,50	96,54	- 0,04
4	91,50	91,59	- 0,10
5	70,00	70,18	-0,26

Como era esperado a torneira maciça contraiu bastante mais que a torneira oca. O valor da contração linear varia entre 0,27% e 2,85%, dependendo da cota, que por sua vez corresponde a uma área com um volume de material menor ou maior, respetivamente. Neste caso os 2% atribuídos para compensações ficaram aquém do que o necessário para compensar a contração, embora isso já fosse esperado, pois o molde de injeção de cera foi construído e dimensionado para modelos de torneiras ocas.

No caso das torneiras ocas, todas as cotas referenciadas da peça vazada sofreram dilatações relativamente ao modelo CAD, ainda que ligeiras. O facto de existir uma boa aproximação e ultrapassar apenas ligeiramente as cotas pretendidas é de facto um bom resultado por dois motivos: a compensação de 2% foi suficiente para que a peça não contraísse abaixo da cota pretendida e a dilatação não foi suficiente para alterar significativamente as dimensões da torneira.

Nesse sentido, o valor de 2% é um valor que, nas condições em que o procedimento foi realizado, se torna uma boa referência para trabalhos futuros.

#### **4.2.2 Contrações nas peças fundidas resultantes de modelos em cera impressos (método direto)**

Como foram impressos apenas modelos ocas, a tabela 49 reflete as contrações médias das duas torneiras vazadas.

**Tabela 49 - Contrações médias das torneiras ocas obtidas através dos modelos em cera impressa**

<b>Referência de Cota</b>	<b>Dimensões CAD [mm]</b>	<b>Dimensões Reais [mm]</b>	<b>Contração [%]</b>
1	67,50	67,80	- 0,44
2	34,00	33,95	0,15
3	96,50	96,67	- 0,18
4	91,50	91,59	- 0,10
5	70,00	69,75	0,36

As dimensões registadas, para as peças vazadas resultantes de modelos em cera impressos apresentam resultados díspares. A principal justificação para isto é o facto de existirem secções que deveriam ser ocas e possuem material, resultante da entrada do metal líquido no vazamento. Relativamente às compensações atribuídas, devido ao facto atrás mencionados, não há uma evidência de que seriam as corretas. Há no entanto a referência das contrações das peças resultantes do método indireto que, ao serem coerentes, acabam por confirmar um comportamento que deve ser padrão, para esta liga de latão.

#### **4.3 Análise de custos dos processos de fabrico de modelos em cera injetados vs. modelos em cera impressos**

Esta análise de custos tem como objetivo determinar qual o método economicamente mais indicado para produzir modelos de torneiras em cera. Pelo tipo de fabrico associado ao modelo em cera – tipo indireto ou direto – é desde logo notório que a resposta será sempre dependente do número de modelos que se pretende obter. A justificação prende-se com o facto de produzir um novo modelo em cera pelo método de conversão direto este implica efetuar uma nova impressão, sendo os custos de um novo modelo iguais aos custos do modelo anterior. No método de conversão direta existe um elevado investimento inicial, para o fabrico do modelo em SL e do molde, que vai gerar o primeiro modelo de torneira em cera. Para a criação de novos modelos em cera, o custo é conta apenas com a injeção de cera que é bastante inferior que a impressão.

Esta análise baseia-se em informações recolhidas dos diversos intervenientes do processo e em orçamentos de produção, sendo apresentada sob a forma de tabelas respeitantes a cada etapa. Cada tabela distingue custos de material, de operação e de colaborador.

A análise aos custos do processo começa desde logo com uma etapa (tab. 50) que é comum aos dois métodos de criação de modelos em cera – modelação de ficheiros CAD 3D.

**Tabela 50 - Custos estimados da modelação CAD 3D dos diferentes elementos de uma torneira**

Material - Nenhum			Máquina - Solidworks			Colaborador – Paulo Machado			Custo Total (€)
Preço (€/kg)	Peso (kg)	Custo (€)	Preço (€/h)	Tempo (h)	Custo (€)	Preço (€/h)	Tempo (h)	Custo (€)	
-	-	-	2,84	10	28,40	16	10	160	188,4

**Método indireto**

Como já referido anteriormente, o método indireto envolve a criação de moldes de injeção, bem como elementos necessários à sua construção, como modelos estereolitográficos.

Os custos apresentados em seguida referem-se a construção de um modelo em cera excluído a preparação e integração do sistema de gragem apropriado para o processo de fundição, uma vez que é uma tarefa posterior à obtenção do modelo em cera e comum aos dois métodos.

Percorrendo a ordem, nesta fase já conhecida, segue-se o fabrico de elementos em estereolitografia. Utilizando a máquina Viper SI2 da 3DSystems, já presente no INEGI há alguns anos, os custos estipulados de operação e material são contabilizados conjuntamente a 40 €/h.

**Tabela 51 - Custos estimados da estereolitografia da torneira e diferentes elementos de apoio**

Material – Preço incluído na máquina			Máquina – Viper SI2			Colaborador – Ricardo Paiva			Custo Total (€)
Preço (€/kg)	Peso (kg)	Custo (€)	Preço (€/h)	Tempo (h)	Custo (€)	Preço (€/h)	Tempo (h)	Custo (€)	
-	-	-	40	10	400	38,4	0,5	19,2	419,2

Após obtenção dos elementos em estereolitografia, a limpeza e cura são considerados custos menores e um pouco subjetivos, uma vez depende da complexidade da peça e da experiência do colaborador. São no entanto atribuídos os valores indicados na tabela 52.

**Tabela 52 - Custos estimados de pós-cura e limpeza**

Material – Nenhum			Máquina – Pós-Cura			Colaborador - Sertório			Custo Total (€)
Preço (€/kg)	Peso (kg)	Custo (€)	Preço (€/h)	Tempo (h)	Custo (€)	Preço (€/h)	Tempo (h)	Custo (€)	
-	-	-	5	2	10	34	0,5	17	27

Tendo os modelos em SL, o passo seguinte é a criação de um molde por vazamento de uma mistura de poliuretano com granalha de alumínio, numa relação de 1:2 respetivamente. Os

custos da resina são de 15€/kg, sendo o preço da granelha de alumínio fixado em 10€/kg. O peso estipulado foi o medido do conjunto dos moldes de injeção da torneira e macho.

**Tabela 53 - Custo de produção dos moldes de injeção de cera (para torneira e macho)**

Material – Resina + Al			Máquina – Nenhuma			Colaborador – Sertório			Custo Total (€)
Preço (€/kg)	Peso (kg)	Custo (€)	Preço (€/h)	Tempo (h)	Custo (€)	Preço (€/h)	Tempo (h)	Custo (€)	
11,5	12	139	-	-	-	34	16	544	683,1

Com os moldes finalizados e prontos para ser injetados, atribui-se, através da consulta de uma fatura e pesquisa de preços de referência, um valor de custo para cada uma das ceras utilizadas: a Cerita F27-74 com um custo de 5 €/kg e a Sol-U-Carv (cera solúvel) com um custo de 30 €/kg. A distribuição do preço/kg das duas ceras foi feita com referência ao peso do modelo em cera com o macho inserido e do modelo sem macho, sendo o valor de conjunto ajustado a 14,4 €/kg. Os restantes custos estão apresentados na tabela 54.

**Tabela 54 - Custos da injeção de cera (cerita e solúvel)**

Material – Cerita + Solúvel			Máquina – Tatum + Projet			Colaborador – Fernando			Custo Total (€)
Preço (€/kg)	Peso (kg)	Custo (€)	Preço (€/h)	Tempo (h)	Custo (€)	Preço (€/h)	Tempo (h)	Custo (€)	
14,4	0,29	4,23	10	0,33	3,33	21,76	0,5	10,8	18,4

Tendo obtido inicialmente o modelo em cera, e, sendo injetado sobre este, o modelo da torneira, o resultado foi uma torneira em cera com o macho solúvel no seu interior. A tarefa seguinte foi portanto remover esse macho, através de uma solução aquosa de 15% de ácido clorídrico.

**Tabela 55 - Custos de remoção do macho solúvel**

Material – Ácido			Máquina – nenhuma			Colaborador – Fernando			Custo Total (€)
Preço (€/kg)	Peso (kg)	Custo (€)	Preço (€/h)	Tempo (h)	Custo (€)	Preço (€/h)	Tempo (h)	Custo (€)	
2	1	2	-	-	-	21,76	0,5	10,88	12,8

Após este último passo, o modelo da torneira em cera é finalmente materializado. Como é possível entender, este método percorre muitas etapas e por essa razão é moroso e tem custos apreciáveis. Contabilizando os valores apresentados em cada um dos passos anteriores, chega-se ao montante aproximado à unidade e descrito na tabela 56.

**Tabela 56 - Custos totais de produção de um modelo em cera pelo método de conversão indireto**

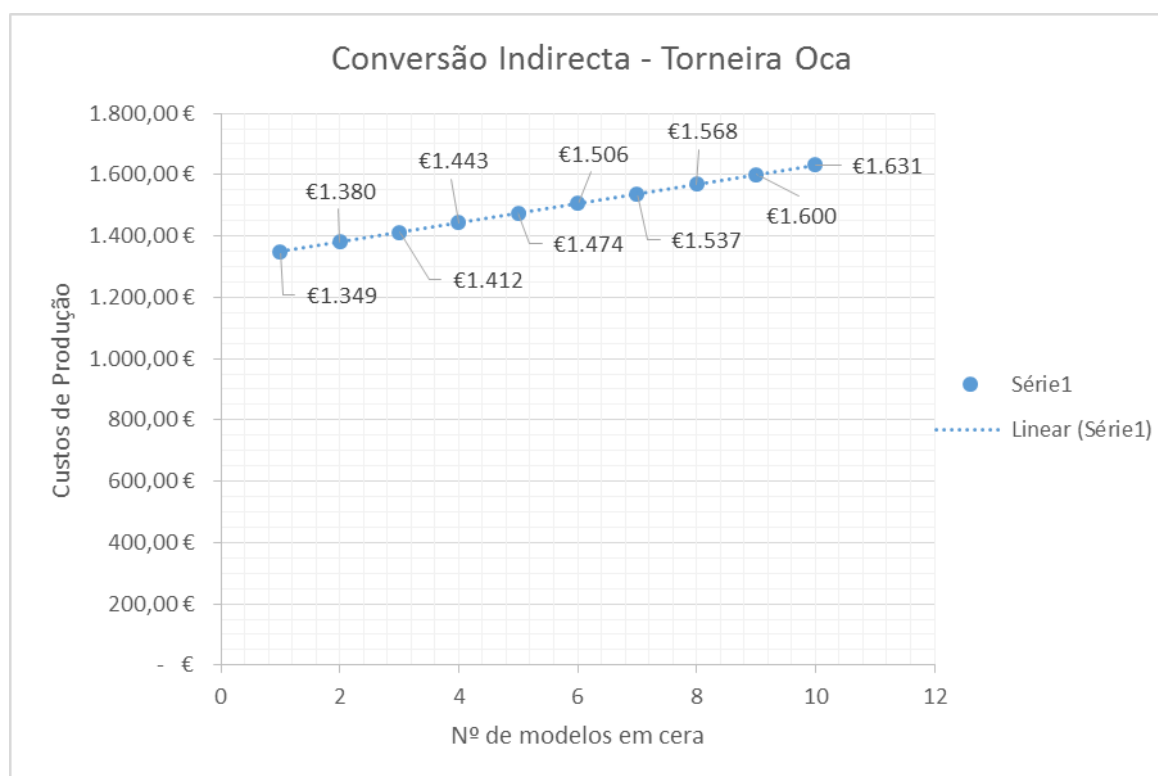
<b>Materiais – Custo (€)</b>	<b>Máquinas – Custo (€)</b>	<b>Colaborador – Custo (€)</b>	<b>Custo Total (€)</b>
145	442	762	1349

O custo total de um modelo em cera produzido através do método de conversão indireto fica por 1349€.

É evidente que o custo mais elevado é a estereolitografia e a construção do molde, sendo que essas etapas são realizadas apenas uma vez, no caso de se pretenderem obter mais do que um modelo. É também notório o impacto do custo do trabalho, no preço final, sendo de resto a maior fatia.

Este método é portanto recomendado quando há necessidade de obtenção de vários modelos de cera, uma vez que para um só modelo o custo é demasiado elevado.

Para mais do que um modelo, a figura 125 permite perceber a evolução dos custos



**Figura 125 - Custos de produção em função do nº de modelos injetados em cera**



### **Método direto**

Apesar da velocidade de impressão 3D da cera ser relativamente lenta, este método de conversão envolve menos procedimentos o que permite obter um modelo em cera mais rapidamente e também por isso deduz-se custoso quando se trata de comparar apenas a produção de um modelo em cera. Antes da impressão é necessário modelar o modelo 3D da torneira. Uma vez que não há tantos elementos a modelar, supõe-se que o tempo de modelação seja cerca de metade, correspondendo a um custo de 94,4€.

A máquina ProJet 3510 CP é uma máquina de impressão exclusiva de modelos em cera. Sendo um modelo relativamente recente, estando por isso há poucos meses no INEGI, os custos de operação ainda não são totalmente conhecidos. Nesse sentido o recomendado foi assumir que os custos de operação da máquina igualassem os custos de material. Embora possa ser um subvalorizamento, esse foi o pressuposto do qual se partiu e não deverá estar muito desconstruído da realidade.

Os custos de impressão do modelo em cera estão definidos na tabela 57.

**Tabela 57 – Impressão 3D de modelo em cera**

<b>Material – Cera + suportes</b>			<b>Máquina – ProJet 3510 CP</b>			<b>Colaborador – Ricardo Paiva</b>			<b>Custo Total (€)</b>
Preço (€/kg)	Peso (kg)	Custo (€)	Preço (€/h)	Tempo (h)	Custo (€)	Preço (€/h)	Tempo (h)	Custo (€)	
266	0,28	74,8	-	-	74,8	38,4	0,5	19,2	168,8

Após impressão do modelo, que dura cerca de 20 horas para o modelo da torneira em concreto. É necessário retirar os suportes de cera solúvel presentes na peça. À semelhança do que acontece no método indireto na fase de limpeza, os custos deste procedimento, são pequenos quando comparados com o custo obtenção do modelo.

**Tabela 58 – Limpeza e remoção dos suportes**

<b>Material – Cera + suportes</b>			<b>Máquina – ProJet 3510 CP</b>			<b>Colaborador – Sertório</b>			<b>Custo Total (€)</b>
Preço (€/kg)	Peso (kg)	Custo (€)	Preço (€/h)	Tempo (h)	Custo (€)	Preço (€/h)	Tempo (h)	Custo (€)	
2	1	2	-	-	74,8	34	0,5	17	19

Com apenas dois passos obtém-se o modelo em cera preparado para iniciar o processo de fundição de cera perdida (após integração do restante sistema de gitagem).

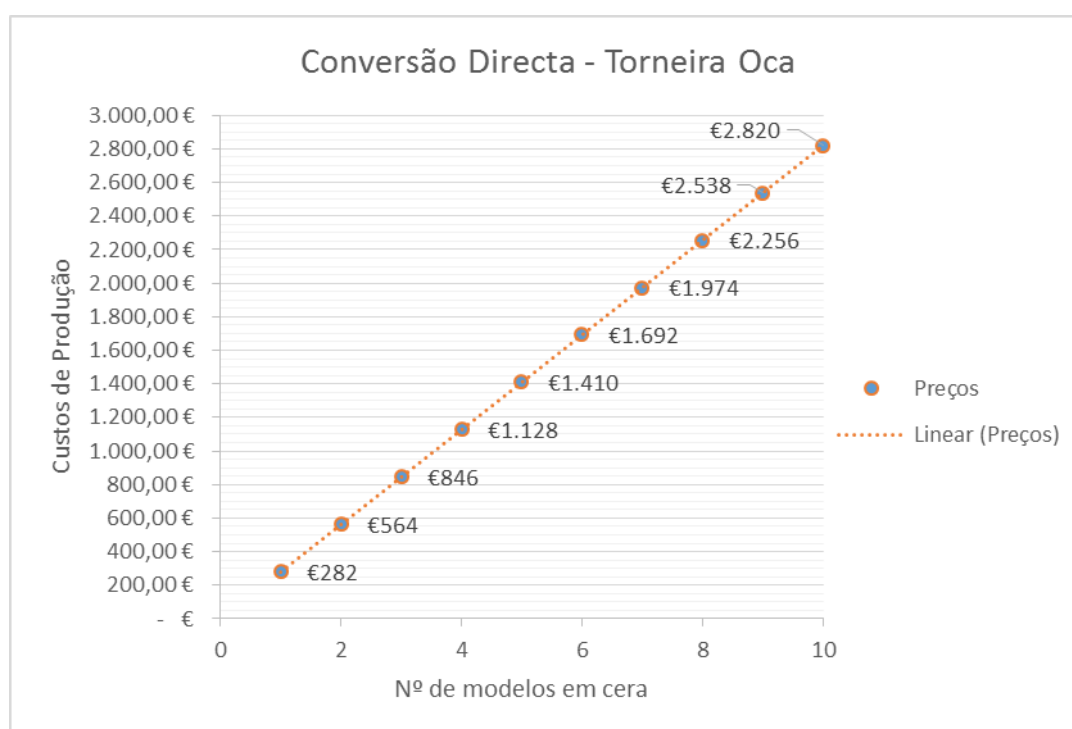
**Tabela 59 - Custos totais de produção de um modelo em cera pelo método de conversão direto**

<b>Materiais – Custo (€)</b>	<b>Máquinas – Custo (€)</b>	<b>Colaborador – Custo (€)</b>	<b>Custo Total (€)</b>
76,80	74,80	36,20	282

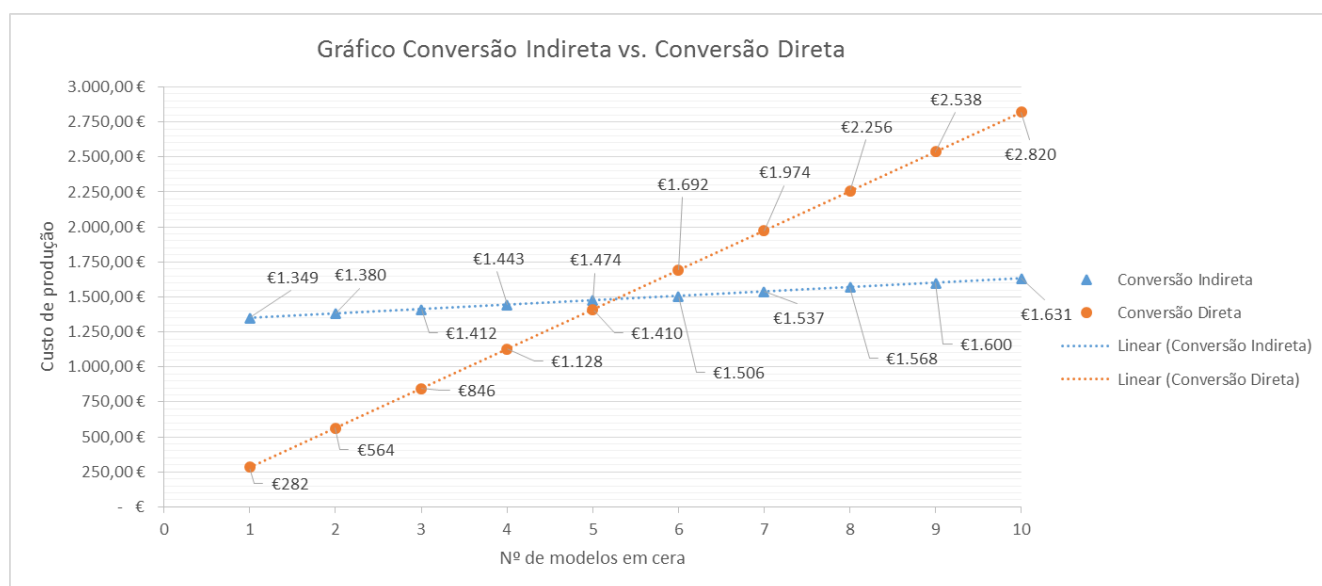
Comparando e interpretando alguns destes valores, é desde logo possível reparar que para a criação de um único modelo em cera, este é o método indicado, apresentando um preço quase cinco vezes inferior que o método alternativo.

O custo total estimado deste processo que permite a impressão 3D de peças é de 282€.

Para a produção de mais modelos, a figura 126 fornece a informação dos custos associados.

**Figura 126 – Custos de produção em função do nº de modelos impressos em cera**

Comparando os gráficos presentes nas imagens 125 e 126, obtém-se o gráfico presente na figura 127.



**Figura 127 - Gráfico comparativo de Conversão indireta vs. Conversão direta para diferentes números de modelos**

Pela análise da figura 127 conclui-se que até 5 modelos em cera compensa produzir modelos impressos. Para mais do que 5 modelos é preferível produzir os modelos injetados.

Alternativamente, foi pedido um orçamento que recorria a outros processos alternativos, como maquinar um modelo em cera, no entanto, este apresenta um orçamento de 850€ por modelo, pelo que se torna num preço desinteressante, face ao calculado tanto na impressão, como na injeção de cera.

Se se pretendesse conhecer o preço de uma torneira na liga de latão fornecida pela Cifial (sem custos de obtenção liga um vez que seria fornecida) teria de se adicionar mais uma série de etapas. Os custos estão descritos resumidamente na tabela 60.

**Tabela 60 - Custos adicionais para a obtenção de um modelo em latão**

Etapa /	Custo (€)
Integração de gitagem	43
Construção de carapaça (cerca de 2 kg para o modelo de torneira considerado, com 10 horas de trabalho)	80
Energia gasta (fornos e restantes equipamentos)	50
<b>Total</b>	<b>173</b>

## 5 Conclusões

Com a realização deste trabalho pretendeu-se percorrer todos os passos do processo de criação de um protótipo de torneira em liga de latão. A documentação e observação das particularidades de cada etapa, em conjunto com a análise realizada aos modelos de torneira vazada, são entendidos como um guia, ou método de produzir protótipos de torneiras, pelo processo de cera perdida.

Dentro dos procedimentos seguidos, a decisão de optar pelo método direto (impressão 3D de cera) ou método indireto (construção de moldes e injeção de cera) vai depender do número de modelos que se pretenda obter. Segundo os cálculos efetuados, até cinco modelos compensa optar pela impressão de cera. Para mais de cinco modelos deve-se optar pela injeção de cera e todos os procedimentos que essa opção implica. Esta decisão baseia-se na análise de custos, onde se conclui que no método indireto, à medida que aumenta o número de modelos requeridos, o custo por modelo desce drasticamente. A título de exemplo, para obter apenas um modelo injetado em cera o custo unitário é de 1348€. Se se pretenderem dez modelos, o custo unitário baixa para cerca de 163€. Aplicando o método direto para obter modelos em cera, o custo por modelo é sempre igual – 282€. Relativamente aos diferentes pesos económicos – materiais, máquinas e colaboradores – conclui-se que o maior peso nos custos é de facto o último referido.

A obtenção de um modelo em cera pelo método de conversão direto é bastante mais expedito quando comparado com o método de conversão indireta, devido ao facto do primeiro envolver menos etapas no seu procedimento.

Este trabalho permitiu também retirar algumas conclusões, relativamente o processo de fundição.

Ficou comprovado que o processo de cera perdida é um processo ótimo para a produção de protótipos de torneiras, uma vez que permite obter, em relativamente pouco tempo e sem ferramentas dedicadas ou exclusivas, modelos de torneiras na liga vazada.

Os vazamentos bem sucedidos das três torneiras ocas, provenientes de modelos em cera injetada, demonstram que, mesmo com espessuras finas e comprimentos elevados na zona interior da torneira, a cerâmica (sem reforço de varetas) teve resistência para garantir a integridade e geometria das torneiras.

A criação da carapaça cerâmica foi das etapas que consumiu mais tempo, devido aos tempos de secagem extremamente elevados. A zona interior da torneira é a principal responsável, uma vez que, a convecção forçada não afeta significativamente o tempo de secagem da parte interior das torneiras ocas.

A maior parte dos defeitos resultantes do processo, devem-se a parâmetros que podem ser ajustados e controlados, como por exemplo a limpeza dos cadinhos e forno e o tempo de secagem entre camadas da carapaça cerâmica.

As contrações sofridas nas torneiras foram de certa forma condizentes com as compensações atribuídas. Assim, para produzir modelos de torneiras ocos em latão, deverá atribuir-se um fator de compensação de contrações a rondar os 2%, já que, segundo os resultados obtidos, garante as dimensões atribuídas no software CAD 3D com uma sobresspessura mínima. A contração será tanto maior quanto maior a espessura de material, como o exemplo das torneiras maciças comprovou.

## 6 Trabalhos futuros

A criação de protótipos é um processo evolutivo, sendo que quando se pretende utilizar a fundição, se torna num processo com uma curva de aprendizagem que pode decair com a adição de novos elementos e mudança de variáveis no procedimento de fabrico. Nesse sentido sugerem-se trabalhos que aprofundem ainda mais o conhecimento sobre o processo:

- Criação de novos modelos de torneira que alarguem o leque de opções disponíveis e simultaneamente comprovem a viabilidade do processo quando sujeito a diferentes formas geométricas e espessuras;
- Investigar formas que permitam um arrefecimento mais expedito das carapaças com machos cerâmicos, dado que a inclusão deste aumenta o tempo de produção;
- Analisar através de métodos de controlo de qualidade não-destrutivos se existem defeitos interiores nas peças vazadas que possam comprometer o seu correto funcionamento;
- Verificar a viabilidade da utilização de machos em areia para a produção de protótipos de torneiras, pelo processo de cera perdida.



## 7 Bibliografia e referências

- Alhanati, Lucien. Acedido a 3 de Maio de 2014. [http://alfaconnection.net/pag\\_avsf/fqm0302.htm](http://alfaconnection.net/pag_avsf/fqm0302.htm).
- Alves, Fernando Jorge Lino. 2001. *Protoclick prototipagem rápida*. Leça do Balio: Protoclick.
- Andreucci, Ricardo. 2003. *Radiologia Industrial*. abende.
- ArteHistoria. "Grifo romano de bronce". <http://www.artehistoria.jcyl.es/v2/obras/18002.htm>.
- ASMHAndbookCommitee. 1998. *Casting*. Vol. 4th printing, ASM Handbook. [S.l.]: ASM International.
- Assembly Bill 1953. 2006. <http://www.truesdail.com/documents/AB1953.pdf>.
- Bell, Eddie. "Feed Sprues and Gates". [www.ganoksin.com/borisat/nenam/wgc-sprues.htm](http://www.ganoksin.com/borisat/nenam/wgc-sprues.htm).
- Brizo. Acedido a 15 de Maio de 2014. [www.brizo.com](http://www.brizo.com).
- Castro, Fernando Portela de e José Manuel Junqueira. 1996. *Latões para fundição*. Barcelos: CETEM - Centro Técnico de Engenharia Mecânica, Metalúrgica e de Materiais.
- Castro, Gabriel de Sousa. 2008. *Estudo e optimização da liga de latão utilizada na GROHE Portugal*, S. A. Porto: [s. n.].
- Chung, Wonjoon. 2009. "Cross-functional collaborative prototyping in the front end of the design process". Ph.D., Illinois Institute of Technology. <http://search.proquest.com/docview/304898897?accountid=43623>.
- Delta. Acedido a 16 de Março de 2014. [www.deltafaucet.com](http://www.deltafaucet.com).
- "Digital Print Preservation Portal". <http://www.dp3project.org/technologies/digital-printing/inkjet>.
- F. P. Almeida, J. Barata. 1991. *Ensaio não destrutivo* Lisboa: I.S.Q. Edições Técnicas, .
- Ferreira, José M. G. de Carvalho. 1999. *Tecnologia da fundição*. Manuais universitários. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- FoundrySuppliers. Acedido a 2 de Maio de 2014. [www.foundry-suppliers.com](http://www.foundry-suppliers.com).
- Gebhardt, Andreas. 2003. *Rapid Prototyping*. Munich: Hanser Publishers.
- Grenda, Ed. 2009. "Printing the future." *The 3D printing and rapid prototyping sourcebook, 3rd edition*. Castle Island Co., Arlington, MA <http://home.att.net/~castleisland>.
- How Products Are Made: Faucet. 6, <http://www.madehow.com/Volume-6/Faucet.html>.
- Hunt, LB. 1980. "The long history of lost wax casting." *Gold bulletin* no. 13 (2):63-79.
- Huntsman. RenShape SI 7810 Stereolithography Material. editado por Inc Huntsman Advance Materials Americas. <http://www.solidconcepts.com/content/pdfs/material-specifications/sla-sl-7810.pdf>.
- Institute, Investment Casting. 2004. *Atlas of Casting Defects*. The Institute.
- Jones, S. e C. Yuan. 2003. "Advances in shell moulding for investment casting." *Journal of Materials Processing Technology* no. 135 (2-3):258-265.



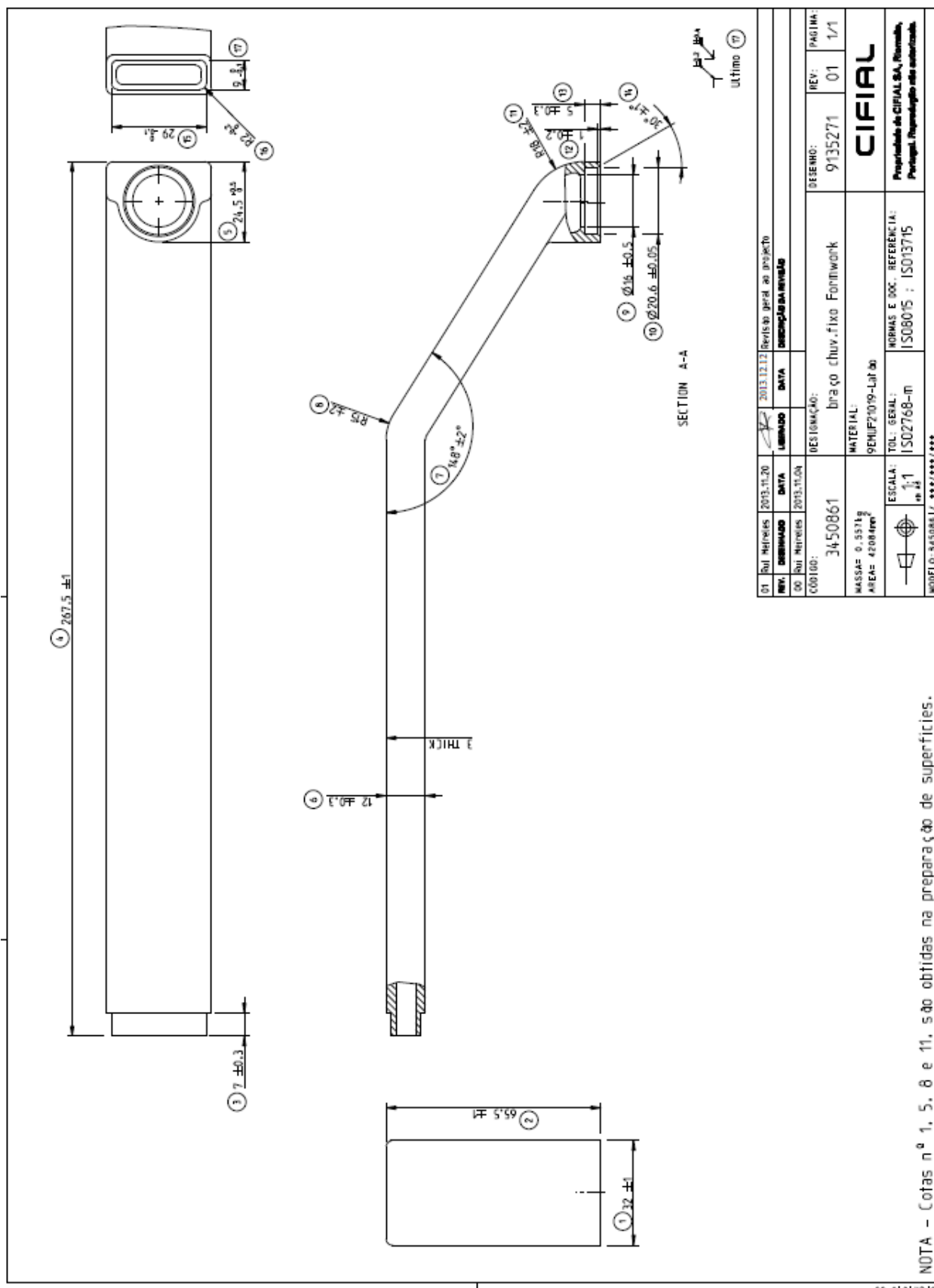
- <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401360200907X>. doi:  
[http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00907-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00907-X).
- Kuhn, Howard e Dana Medlin. 2000. "ASM Handbook. Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation." *ASM International, Member/Customer Service Center, Materials Park, OH 44073-0002, USA, 2000*. 998.
- Lead Free Legislation: The Affect on the Plumbing Industry. [http://www.asse-plumbing.org/Chapters/NOH\\_LeadFree.pdf](http://www.asse-plumbing.org/Chapters/NOH_LeadFree.pdf).
- LeroyMerlin. Acedido a 15 de Março de 2014. [www.leroymerlin.pt](http://www.leroymerlin.pt).
- Magalhães, Luís Moreira; José Araújo; Bruno. 2009. *Controlo de Qualidade na Fundição*. FEUP.
- Marques, Flávio Dias Ferreira. 2010. *Desenvolvimento do processo de vazamento em coquilhas rotativas*. Porto: [s. n.].
- McDonald, Julia A, Chris J Ryall e David I Wimpenny. 2001. *Rapid prototyping casebook*. Wiley.
- Miracle, Daniel B, Steven L Donaldson, Scott D Henry, Charles Moosbrugger, Gayle J Anton, Bonnie R Sanders, Nancy Hrivnak, Carol Terman, Jill Kinson e Kathryn Muldoon. 2001. "ASM Handbook." no. 17.
- Moen. Acedido a 7 de Abril de 2014. [www.moen.com](http://www.moen.com).
- Monteiro, Alcino João dos Santos Cunha. 2005. "Revestimentos multicamada PVD com comportamento electrocrómico."
- Nascimento, André Luís de Brito Baptista; Ângelo Rosestolato Soares; Ivaldo Assis do. *O ensaio metalográfico no controle da qualidade*. [http://www.spectru.com.br/ensaio\\_metal.pdf](http://www.spectru.com.br/ensaio_metal.pdf).
- Neto, R, Bárto Paiva e Ricardo Paiva. 2001. "Obtenção de Protótipos Metálicos para Fundição Injectada". Comunicação apresentada em 11º Congresso Nacional de Fundição, Ipanema Park Hotel, Porto.
- Neto, Rui Lemos, F Jorge Lino e A Barata da Rocha. "Utilização da Prototipagem rápida no apoio ao desenvolvimento de Produtos Forjados e Fundidos."
- OxfordInstruments. PVD Chamber. <http://www.oxford-instruments.com/>.
- Raja, Vinesh e Kiran J. Fernandes. 2007. *Reverse Engineering: An Industrial Perspective*. Springer Publishing Company, Incorporated.
- Raquet, Jeffrey Scott. 2005. "An investigation into the material properties and precision of rapid prototyping technology". Ph.D., The University of North Carolina at Charlotte. <http://search.proquest.com/docview/305373783?accountid=43623>.
- Ribeiro, Susana. 1999. "Processo de Cera Perdida", FEUP.
- Santos, J. F. Oliveira. 1999. *Ensaio não Destrutivos*. ModulForm - Formação Modelar: IEFP.
- Smith, G. e T. Claustre. 2004. *Using reverse engineering to support product development activities*. Editado por D. Marjanovic. Design 2004: Proceedings of the 8th International Design Conference, Vols 1-3. Zagreb: Univ Zagreb, Faculty Mechanical Engineering & Naval Architecture.
- "TPJ - The Tube & Pipe Journal." 2011. <http://www.thefabricator.com/article/metalsmaterials/antimicrobial-copper-displaces-stainless-steel-germs-for-medical-applications>.
- Verran, Guilherme. Introdução aos Processos de Fundição. [slideplayer.com.br/slide/363811](http://slideplayer.com.br/slide/363811).
- VisiJet Materials for ProJet CP & CPX Printers. editado por 3DSsystems: 3DSsystems. [http://www.3dsystems.com/sites/www.3dsystems.com/files/projet\\_3500\\_realwax\\_uk.pdf](http://www.3dsystems.com/sites/www.3dsystems.com/files/projet_3500_realwax_uk.pdf).

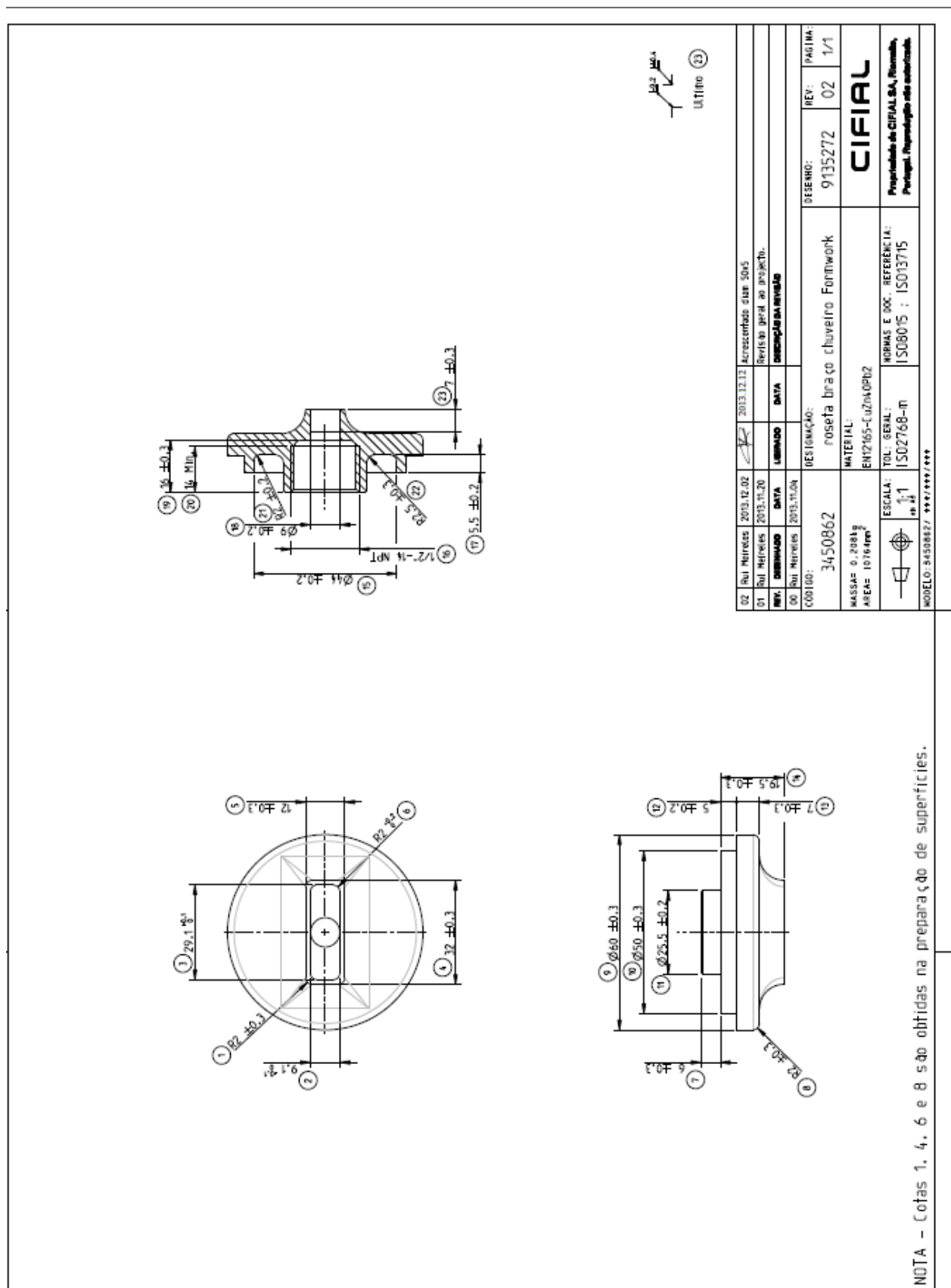
- Wohlers, Terry T. 2013. *Wohlers Report 2013: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry: Annual Worldwide Progress Report*.
- Wolff, T.M. Investment casting waxes: influences which eliminate wax patter defects. . <http://www.paramelt.com/files/Pdf/casting-wax/Investment-casting-wax-Technical-publication-Paramelt-Argueso-Kindt.pdf>.
- WolverineBrass. [www.wolverinebrass.com](http://www.wolverinebrass.com).





**ANEXO A: Desenhos CAD das torneiras consideradas e modeladas (com cotas).**









**ANEXO B: Fichas com as características da máquina de estereolitografia – Viper SI2 – e de impressão de cera – ProJet 3510 CP - utilizadas**

## Viper si2 SLA System Specifications

**Standards and Regulations:** This SLA system conforms to Federal Laser Product Performance Standards 21CFR1040.10 Class I laser in normal operation. During field service, emission levels can correspond to Class IV laser product. The Viper si2 system complies with CE requirements.

LASER	
Type	Solid state Nd:YVO <sub>4</sub>
Wavelength	354.7 nm
Power at vat	100 mW available
Laser Warranty	7500 hours or 12 months (whichever comes first)
RECOATING SYSTEM	
Process	Zephyr recoating system
OPTICAL & SCANNING	
Beam (diameter @ 1/e <sup>2</sup> )	Standard mode 0.250 +/- 0.005 mm Hi res mode 0.075 +/- 0.015 mm
ELEVATOR	
Vertical resolution	0.0005 mm
Position repeatability	0.0076 mm
Maximum part weight	9.1 kg
Typical velocity during part building	5 mm/sec
VAT CAPACITY	
Volume	32.21 L
Maximum build envelope in standard mode	250 x 250 x 250 mm XYZ
Maximum build envelope in HR mode	125 x 125 x 250 mm XYZ
Interchangeable vat	Yes
SYSTEM CONTROLLER & SOFTWARE	
Control software	Buildstation 5.3 software
Operating system	Windows NT 4.0 with Service Pack 3 or higher
Input data file format	stl, alc
Network type and protocol	Ethernet, IEEE 802.3 10/100 Base-T
POWER	
100 - 120 VAC +/-10% 50/60 Hz, 6 amps	15 amp, 115V
220 - 240 VAC +/-10% 50/60 Hz, 3 amps	8 amp, 230V
UPS power rating	2KVA minimum
AMBIENT TEMPERATURE	
Temperature range	23°C +/- 3°C
Maximum change rate	1°C/hour
Relative humidity	20 - 50%, non condensing
SIZE	
Crated machine	W168 x D102 x H211 cm
Uncrated machine	W134 x D86 x H178 cm
WEIGHT	
Crated machine	564 kg
Uncrated machine	463 kg
OPTIONS	
Additional interchangeable vats	
Additional build platforms	
Post Curing Apparatus (PCA) equipment	
SYSTEM WARRANTY	
One year from installation date.	
Includes parts, labor, and 3D Systems' software upgrades.	



the solid imaging company

### 3D Systems Europe Ltd.

Mark House

Mark Road

Hamal Hampstead

Herts HP2 7UA

tel/ (+44) 1442 282 600

fax/ (+44) 1442 282 601

email/ marketing.uk@3dsystems.com

### 3D Systems GmbH

Postfach 12 02 07

D-64239 Darmstadt

Germany

tel/ (+49) 61 51 / 3 57-0

fax/ (+49) 61 51 / 3 57-333

email/ info@3dsystems-europe.com

www.3dsystems.com

Nasdaq: TDSC

FRANCE

tel/ (+33) 1 69 35 17 17

HONG KONG

tel/ (+852) 2923 5077

ITALY

tel/ (+39) 039 68 904 00

JAPAN

tel/ (+81) 3 5451 1890

USA

tel/ (+1) 661 295 5600 ext. 2882





© Copyright 2003 by 3D Systems Inc. All rights reserved. Specifications subject to change without notice. The 3D logo and SLA are registered trademarks and 3D Systems, si2, Lightyear, Buildstation, PCA, and Zephyr are trademarks of 3D Systems. "the solid imaging company" is a service mark of 3D Systems. All other product names or services mentioned are trademarks or registered trademarks of their respective companies.

P/N 70433 Rev. 03/03-UK fiedler.de

# ProJet® 3500 CP & CPX

Professional 3D Printers Series

Extend Innovation. Extend Production. Extend Choices.

				
	ProJet® 3500 CP	ProJet® 3500 CPX	ProJet® 3500 CPXPlus	ProJet® 3500 CPXMax
Printing Modes	HD - High Definition HDHQ - High Definition/High Quality - -	HD - High Definition HDHQ - High Definition/High Quality - XHD - Xtreme High Definition	HD - High Definition HDHQ - High Definition/High Quality UHD - Ultra High Definition XHD - Xtreme High Definition	HD - High Definition HDHQ - High Definition/High Quality UHD - Ultra High Definition XHD - Xtreme High Definition
Net Build Volume (xyz)				
HD Mode	11.75 x 7.3 x 8" (298 x 185 x 203 mm)	11.75 x 7.3 x 8" (298 x 185 x 203 mm)	11.75 x 7.3 x 8" (298 x 185 x 203 mm)	11.75 x 7.3 x 8" (298 x 185 x 203 mm)
HDHQ Mode	11.75 x 7.3 x 8" (298 x 185 x 203 mm)	11.75 x 7.3 x 8" (298 x 185 x 203 mm)	11.75 x 7.3 x 8" (298 x 185 x 203 mm)	11.75 x 7.3 x 8" (298 x 185 x 203 mm)
UHD Mode	-	-	8 x 7 x 6" (203 x 178 x 152 mm)	11.75 x 7.3 x 8" (298 x 185 x 203 mm)
XHD Mode	-	5 x 7 x 6" (127 x 178 x 152 mm)	8 x 7 x 6" (203 x 178 x 152 mm)	11.75 x 7.3 x 8" (298 x 185 x 203 mm)
Resolution				
HD Mode	375 x 375 x 775 DPI (xyz); 33µ layers	375 x 375 x 775 DPI (xyz); 33µ layers	375 x 375 x 775 DPI (xyz); 33µ layers	375 x 375 x 775 DPI (xyz); 33µ layers
HDHQ Mode	375 x 375 x 775 DPI (xyz); 33µ layers	375 x 375 x 775 DPI (xyz); 33µ layers	375 x 375 x 775 DPI (xyz); 33µ layers	375 x 375 x 775 DPI (xyz); 33µ layers
UHD Mode	-	-	694 x 750 x 1300 DPI (xyz); 20µ layers	694 x 750 x 1300 DPI (xyz); 20µ layers
XHD Mode	-	694 x 750 x 1600 DPI (xyz); 16µ layers	694 x 750 x 1600 DPI (xyz); 16µ layers	694 x 750 x 1600 DPI (xyz); 16µ layers
Accuracy (typical)	0.001-0.002 inch (0.025-0.05 mm) per inch of part dimension. Accuracy may vary depending on build parameters, part geometry and size, part orientation, and post-processing.			
E-mail Notice Capability	Yes	Yes	Yes	Yes
Tablet/Smartphone connectivity	Yes	Yes	Yes	Yes
5 Year Printhead Warranty	Standard	Standard	Standard	Standard
Build Materials	VisiJet® Pro wax	VisiJet® Hi-Cast	VisiJet® Hi-Cast	VisiJet® Hi-Cast
Support Material	VisiJet® S400	VisiJet® S400	VisiJet® S400	VisiJet® S400
Material Packaging	In clean 3.86 lbs (1.75 kg) bottles (machine holds up to 2 with auto-switching)			
Build materials	In clean 3.86 lbs (1.75 kg) bottles (machine holds up to 2 with auto-switching)			
Support materials				
Electrical	100-127 VAC, 50/60 Hz, single-phase, 15A; 200-240* VAC, 50 Hz, single-phase, 10A			
Dimensions (WxDxH)				
3D Printer Crated	32.5 x 56.25 x 68.5" (826 x 1429 x 1740 mm)	32.5 x 56.25 x 68.5" (826 x 1429 x 1740 mm)	32.5 x 56.25 x 68.5" (826 x 1429 x 1740 mm)	32.5 x 56.25 x 68.5" (826 x 1429 x 1740 mm)
3D Printer Uncrated	29.5 x 47 x 59.5" (749 x 1194 x 1511 mm)	29.5 x 47 x 59.5" (749 x 1194 x 1511 mm)	29.5 x 47 x 59.5" (749 x 1194 x 1511 mm)	29.5 x 47 x 59.5" (749 x 1194 x 1511 mm)
Weight				
3D Printer Crated	955 lbs, 434 kg	955 lbs, 434 kg	955 lbs, 434 kg	955 lbs, 434 kg
3D Printer Uncrated	711 lbs, 323 kg	711 lbs, 323 kg	711 lbs, 323 kg	711 lbs, 323 kg
ProJet® Accelerator Software	Easy build job set-up, submission and job queue management; Automatic part placement and build optimization tools; Part stacking and nesting capability (except ProJet CP); Extensive part editing tools; Automatic support generation; Job statistics reporting tools			
Print3D App	Remote monitoring and control from tablet, computers and smartphones			
Network Compatibility	Network ready with 10/100 Ethernet interface			
Client Hardware Recommendation	1.8 GHz with 1GB RAM (OpenGL support 64 mb video RAM) or higher			
Client Operating System	Windows XP Professional, Windows Vista, Windows 7			
Input Data File Formats Supported	STL	STL and SLC	STL and SLC	STL and SLC
Operating Temperature Range	64-82 °F (18-28 °C)	64-82 °F (18-28 °C)	64-82 °F (18-28 °C)	64-82 °F (18-28 °C)
Noise	< 65 dBA estimated (at medium fan setting)			
Certifications	CE	CE	CE	CE

\* Requires small external transformer supplied by 3D Systems in the provided country kit.

www.3dsystems.com



333 Three D Systems Circle  
Rock Hill, SC 29730 USA  
Telephone +1 (803) 326-3948  
moreinfo@3dsystems.com

Warranty/Disclaimer: The performance characteristics of these products may vary according to product application, operating conditions, material combined with, or with end use. 3D Systems makes no warranties of any type, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability or fitness for a particular use.

© 2013 by 3D Systems, Inc. All rights reserved. Specifications subject to change without notice. RealWax is a trademark and the 3D Systems logo, stylized text, ProJet and VisiJet are registered trademarks of 3D Systems, Inc.